



**Élelmiszertudományi Kar**

# **SZEMESTERMÉNYEK NEDVESSÉGTARTALMÁNAK ÉS DIELEKTROMOS JELLEMZŐINEK ÖSSZEFÜGGÉSE**

**Doktori értekezés**

**Készítette:**

**Gillay Bíborka Zsuzsanna**

**Konzulensek:**

**Dr. David B. Funk**

**Dr. Felföldi József**

**Budapesti Corvinus Egyetem  
Élelmiszertudományi Kar  
Fizika-Automatika Tanszék**

**Budapest  
2013**

**A doktori iskola**

**megnevezése:** Élelmiszertudományi Doktori Iskola

**tudományága:** Élelmiszertudományok

**vezetője:** Dr. Fodor Péter, DSc  
egyetemi tanár  
Budapesti Corvinus Egyetem


**Témavezetők:** Dr. David B. Funk, PhD, DSc (hc)  
Deputy Director, Chief Scientist  
USDA- GIPSA Technology & Science Division

Dr. Felföldi József, DSc  
egyetemi tanár  
Budapesti Corvinus Egyetem  
Fizika-Automatika Tanszék

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, az értekezés műhelyvitájában elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, azért az értekezés nyilvános vitára bocsátható.

The applicant met the requirement of the PhD regulations of the Corvinus University of Budapest and the thesis is accepted for the defence process.

.....  
Az iskola vezető jóváhagyása



.....  
A témavezetők jóváhagyása  
(Signature of Supervisors)

**A Budapesti Corvinus Egyetem Élettudományi Területi Doktori Tanácsának 2013-03-05-i határozatában a nyilvános vita lefolytatására az alábbi bíráló Bizottságot jelölte ki:**

**BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG:**

**Elnöke:**

**Vatai Gyula, DSc, BCE**

**Tagjai:**

**Salgó András, DSc, BCE**

**Kaffka J. Károly, CSc**

**Géczi Gábor, PhD, SzIE**

**Szalai Lajos, CSc**

**Opponensek:**

**Sembery Péter, CSc, SzIE**

**Fenyvesi László, PhD, VM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet**

**Titkár:**

**Kovács Zoltán, PhD, BCE**



# TARTALOMJEGYZÉK

<b>1 BEVEZETÉS .....</b>	<b>1</b>
<b>2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS .....</b>	<b>3</b>
2.1 A NEDVESSÉGMÉRÉS GYAKORLATA.....	3
2.1.1 Szemestermények nedvességmérése .....	3
2.1.2 Gyors nedvességmérő technológiák.....	4
2.1.3 Zavaró hatások .....	5
2.1.3.1 Sűrűség.....	5
2.1.3.2 Hőmérséklet.....	6
2.1.3.3 Beltartalom.....	6
2.1.3.4 Szemeken belüli egyenlőtlen nedvességeloszlás .....	6
2.1.3.5 Keverékek .....	8
2.2 ELMÉLETI HÁTTÉR.....	9
2.2.1 Permittivitás .....	9
2.2.2 A permittivitás frekvencia függése .....	10
2.2.3 Orientációs polarizáció.....	11
2.2.4 A vezetőképesség hozzájárulása a permittivitáshoz.....	12
2.2.5 Felületi polarizáció .....	13
2.2.6 Keverék egyenletek és sűrűségkorrekció .....	14
2.2.7 Gabonaszemek orientációja.....	16
2.2.8 Gabonában lévő víz.....	17
2.2.9 Argand diagramos ábrázolás .....	17
2.2.10 Gabonaminták áramköri modellezése .....	19
2.3 AZ IRODALOM ÖSSZEFOGLALÁSA .....	22
<b>3 CÉLKITŰZÉSEK.....</b>	<b>23</b>

<b>4 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK.....</b>	<b>25</b>
4.1 ANYAGOK.....	25
4.2 ALKALMAZOTT TESZTCELLÁK.....	25
4.2.1 GAC tesztcella.....	26
4.2.2 UGMA tesztcella.....	28
4.2.3 Hengerkondenzátor .....	29
4.3 AZ IMPEDANCIA MÉRÉSE.....	30
4.4 A SZÁMÍTOTT NEDVESSÉGTARTALOM MEGHATÁROZÁSA .....	32
4.5 A MÉRÉSI ÖSSZEÁLLÍTÁSOK ÉS A MÉRÉSEK MENETE .....	33
4.5.1 A betöltési módok vizsgálata .....	33
4.5.2 A nyomás hatásának vizsgálata.....	34
4.5.3 Inhomogén nedvességeloszlás.....	35
4.5.3.1 A gabonaszemekben belüli egyenlőtlen nedvességeloszlás vizsgálata.....	36
4.5.3.2 Keverékek vizsgálata.....	37
4.6 AZ ARGAND GÖRBE PARAMÉTEREI .....	40
4.7 DIELEKTROMOS POLARIZÁCIÓ FELSZŐ HATÁRÁNAK BECSLÉSE .....	42
<b>5 EREDMÉNYEK.....</b>	<b>45</b>
5.1 A DIELEKTROMOS SPEKTRUM TULAJDONSÁGAI 100 MHZ ALATT.....	45
5.1.1 A szója dielektromos spektruma .....	45
5.1.2 Argand ábrázolás.....	47
5.2 AZ LLL SŰRŰSÉGKORREKCIÓ MŰKÖDÉSE 100 MHZ ALATT.....	50
5.2.1 GAC tesztcella.....	51
5.2.1.1 Az LLL sűrűségkorrekció és a betöltések vizsgálata.....	51
5.2.1.2 Az LLL sűrűségkorrekció és a nyomás vizsgálata .....	51
5.2.2 UGMA tesztcella.....	53
5.2.2.1 Az LLL sűrűségkorrekció és a betöltések vizsgálata.....	53
5.2.2.2 Az LLL sűrűségkorrekció és a nyomás vizsgálata .....	55

5.2.3 Hengerkondenzátor tesztcella .....	57
5.2.3.1 Az LLL sűrűségkorrekció és a betöltések vizsgálata.....	57
5.2.3.2 Az LLL sűrűségkorrekció és a nyomás vizsgálata .....	58
5.2.4 Módosított hengerkondenzátor tesztcella.....	60
5.2.4.1 Az LLL sűrűségkorrekció és a betöltések vizsgálata.....	60
5.2.4.2 Az LLL sűrűségkorrekció és a nyomás vizsgálata .....	60
5.3 DIELEKTROMOS SPEKTRUMOK NYOMÁSFÜGGÉSE .....	62
5.3.1 GAC tesztcella.....	62
5.3.2 Hengerkondenzátor tesztcella .....	64
5.3.3 Módosított hengerkondenzátor tesztcella.....	65
5.3.4 UGMA tesztcella.....	66
5.4 A TERHELÉS HATÁSA AZ ARGAND ÁBRÁKON.....	70
5.5 MINTÁN BELÜLI EGYENLŐTLEN NEDVESSÉGELOSZLÁS .....	74
5.5.1 Gabonaszemekben belüli egyenlőtlen nedvességeloszlás .....	74
5.5.2 Száraz-nedves kukorica keverékek vizsgálata .....	85
5.6 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	93
<b>6 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....</b>	<b>95</b>
<b>7 ÖSSZEFOGLALÁS .....</b>	<b>97</b>
7.1 SUMMARY .....	98
<b>8 MELLÉKLETEK .....</b>	<b>99</b>
M1. IRODALOMJEGYZÉK .....	99
M2. relatív dielektromos állandó FELSZŐ HATÁR SZÁMOLÁSA .....	107
M3. NYOMÁS HATÁSA AZ ARGAND GÖRBÉKRE.....	110





# 1 BEVEZETÉS

A nedvességtartalom az egyik legfontosabb minőségi jellemzője a szemesterményeknek, amelytől a gabona biztonságos tárolása és kereskedelmi értéke függ. A gépesített betakarítás során a szemestermények általában a tárolási nedvességtartalomnál nedvesebb állapotban kerülnek betakarításra, ezért tárolási technológiájukban jelentős szerepet kapott a szárítás. A szárítók szabályozásának pontosságát igen sok tényező befolyásolja. A szabályozási hiba jelentős része a termény nedvességtartalmának mérési pontatlanságából adódik. Ha a gabona nem eléggé száraz mikrobiológia folyamatok, romlási gócok alakulhatnak ki, a túlszáritással pedig a termény mechanikai tulajdonságai romlanak. Bár a gabona nedvességmérésnek már közel 100 éves múltja van, de még mindig számos megoldatlan kérdés nehezíti a pontos nedvességmérők megalkotását. A nedvességtartalom meghatározásának két lehetséges módszere van, a közvetlen és a közvetett. A közvetlen nedvességmérési eljárások közös jellemzője, hogy az anyag nedvességtartalmának meghatározásához eltávolítják a víztartalmat. A közvetett mérési eljárások a vizsgált anyagnak a nedvességtartalomtól lehetőleg egyértelműen függő, jól mérhető tulajdonságát használják fel, mint például a villamos vezetőképesség, a relatív permittivitás, a hővezető képesség, az abszorpciós képesség, az egyensúlyi légnedvesség. Ezek a mérési eljárások lényegesen gyorsabbak a közvetlen módszereknél, azonban egy olyan jellemzőt mérnek, ami nem csak a víztartalomtól függ. Ebből következik, hogy a mérési pontosság igen sok tényező függvénye. Léteznek olyan mérési eljárások, amelyeket e zavaró tényezők alig befolyásolnak (mikrohullámú, izotóptechnikai módszerek, mágneses magrezonancián alapuló eljárás), azonban viszonylagos bonyolultságuk, magas költségeik miatt az iparban nem terjedtek el. Az RF dielektromos módszerben kombinálódik a megfelelő pontosság és az egyes műszerek közötti szabványosítás lehetősége. Viszonylag egyszerű a kalibráció fejlesztése, és a gyártási költségek is elfogadhatók. A gyártók olyan megoldásokat keresnek, amelyek lehetőség szerint nem igényelnek drága technológiát. Ez az ok, amiért a legújabb kutatások ellenére, amelyek szerint a 100 MHz feletti frekvenciatartományokban érdemes mérni, várhatóan még sokáig fognak alacsony frekvenciás berendezéseket használni. A dielektromos nedvességmérési módszer pontosságát befolyásoló tényezők a halmazsűrűség változás, a hőmérséklet, és az egyenlőtlen nedvességeloszlás a szemek között és a szemeken belül. A 100 MHz alatti frekvenciatartományban különösen fontos a mérőfrekvencia körültekintő megválasztása.

A minták közötti sűrűségkülönbségekből adódó nedvességmérési hibák oka, hogy a dielektromos tulajdonságok alapvetően térfogat alapúak, míg gabona nedves bázisra vonatkoztatott nedvességtartalma tömegalapú (a víz tömege a gabonában osztva a nedves gabona tömegével). Az on-line nedvességmérés egyik legnagyobb kihívása a sűrűségkülönbségek miatt van, hiszen a minta

betöltése vagy a mérőcellában lévő gabonahalmaz terhelése ellenőrizhetetlen, emiatt nehéz pontosan meghatározni a tényleges sűrűségkülönbségeket. A gabona nedvességmérési gyakorlatban elterjedt Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció alkalmazásával a halmaztömörödöttségek változásából adódó hiba jól korrigálható 100 MHz felett. Olyan kutatást még nem folytattak, amely a sűrűségkorrekció alkalmazhatóságát vizsgálja a nyomás hatásának korrigálására, különböző tesztcella kialakításoknál, 100 MHz-nél kisebb frekvenciákon, ezért ez lett vizsgálataim egyik tárgya. Dolgozatomban megvizsgáltam a nyomás dielektromos jellemzőkre gyakorolt hatását.

Inhomogén nedvességeloszlás létrejöhet: a szemeken belül, szárítás hatására vagy száraz és nedves gabonaszemek keveredésével, a szemek között. A frissen szárított gabonaminta nedvességtartalmát pontosan nehéz mérni. A dielektromos elven működő nedvességmérők köztudottan alábecsülik a kiegyenlített minta nedvességtartalmát, mert ezek a műszerek a gabonaszemek külső rétegének nedvességtartalmára érzékenyek. (Zimmerman 1976, Bye 1986, Grain Handler USA, 2004.) Így a minta kiegyenlítődes után mért nedvességtartalma várhatóan nagyobb lesz, mint előtte. Ez a jelenség száraz és nedves kukorica keverékeknél is hasonlóan jelentkezik. Dolgozatomban megvizsgáltam az inhomogén nedvességeloszlás hatását kukorica minták dielektromos jellemzőire 100 MHz alatt. Módszereket dolgoztam ki a szárított és a keverék minták kiegyenlítődött és inhomogén nedvességeloszlású állapotának szétválasztására.

A 100 MHz alatti frekvenciákon a gabonák dielektromos spektrumaiban két vezetési hatás figyelhető meg: az elektród polarizáció és a Maxwell-Wagner relaxáció, melyek viselkedése függ a gabona nedvességtartalmától, a tesztcella kialakítástól, a halmaztömörödöttségtől és az inhomogén nedvességeloszlástól. Munkámban e két hatás dielektromos spektrumra gyakorolt hatását és ezek változását vizsgáltam meg a különböző zavaró tényezők függvényében.

## 2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben a gabona nedvességmérés gyakorlatát és elméleti hátterét foglaltam össze, amely felhasználásával állítottam fel a kutatásom céljait.

### 2.1 A NEDVESSÉGMÉRÉS GYAKORLATA

A gabona nedvességtartalma az egyik legfontosabb minőségi jellemző, amely meghatározza a gabona eltarthatóságát és az árát. A gabona tárolásának kezdetén fontos a gabona nedvességtartalmának megfelelő szintre való beállítása, hogy a romlási folyamatokat megelőzzék. A gabona nedvességtartalma csökkenthető természetes száradással, vagy mesterségesen, szárítóberendezéssel. A mesterséges szárítás energiaigényes, így a gabona túlszárítása a minőségre való rossz hatása mellett a költség miatt is kerülendő.

A nedvességtartalmat a mintában lévő víz tömegének százalékos értékeként határozzák meg. Használatos a száraz és a nedves bázisra vonatkoztatott nedvességtartalom. A jelenlegi gyakorlatnak megfelelően a dolgozatomban a nedves bázisra vonatkoztatott nedvességet használtam, amely az (1) összefüggéssel adható meg (MSZ6367/3-83 1983, Wilhelm et al. 2004):

$$M_n = \frac{m_{\text{víz}}}{m_{\text{minta}}} \cdot 100 \quad (1)$$

ahol  $M_n$  a nedves bázisra vonatkoztatott nedvességtartalom,  $m_{\text{víz}}$  a gabonában lévő víz tömege, és  $m_{\text{minta}}$  a minta tömege. A magyar szabvány szerint a nedvességtartalom mértékegysége a %(m/m), dolgozatomban a nemzetközileg használt mértékegységet a %-ot használtam. A nedvességtartalom jelölésére a továbbiakban az M-et fogom használni.

#### 2.1.1 Szemestermények nedvességmérése

Az optimális gabonanedvesség beállításához, fontos egy megbízható nedvességmérési technika, amely a szárítás folyamán, vagy a szárítás előtt és után megfelelő eredményt szolgáltat. A kereskedelemben a gabona nedvességtartalmának ármeghatározó szerepe van, mivel a vevő nem a vízért akar fizetni. Ebben az esetben a gabona hőmérséklete és állapota kiegyenlített, így a nedvességmérést kevesebb zavaró tényező befolyásolja, viszont a pontossággal támasztott követelmények igen szigorúak (Hoffman et al. 1976).

A gabona nedvességtartalmának a világon elterjedt referencia mérési módszere a szárítószelektíves mérés. A szárítószelektíves mérés lényege a minta szárítása súlyállandóságig, miközben az lead minden nedvességet. A minta szárítás előtti és utáni tömege ismeretében a

nedvességtartalom meghatározható. A mérési eljárás az egész világon különböző. Az ok, hogy a gabona szárítása során nem csak a víz távozik, hanem egyéb illó anyagok is. Másrészt a gabona tulajdonságai miatt szárítással nagyon nehéz a víz teljes eltávolítása. Továbbá nem csak a módszer, hanem az eredmények is mutatnak kismértékű különbséget, amely akkor érdekes, amikor ezen eredmények alapján kalibrációt fejlesztenek (Burden 1998).

A szárítószekrényes mérés igen hosszadalmas és munkaigényes, ezért a mindennapi nedvességmérésekhez nem alkalmazzák. Az úgynevezett gyors nedvességmérő berendezéseket használják a gabona nedvességtartalmának meghatározására a gabona kezelése és kereskedelme során.

### **2.1.2 Gyors nedvességmérő technológiák**

A 20. század elején felfedezték, hogy a gabona ellenállása és a nedvességtartalma korrelál egymással. Az ellenállás logaritmikusan növekszik a nedvességtartalom csökkenésével. Az első gabona nedvességmérők hengerek között átpréselt gabona ellenállásmérésén alapultak (Briggs 1908). A mai napig használnak ilyen műszereket, mert alacsony az áruk, de pontatlanságuk miatt nem elterjedtek, és ármeghatározáshoz nem használhatók.

A gyors nedvességmérésnek két technikája terjedt el. Az egyik az infravörös technika (NIR), amely igen pontos eredményt szolgáltat, de igen drága. Emellett nem alkalmas például a napraforgó nedvességtartalmának mérésére. A másik nehézség ezzel a módszerrel, hogy összetettsége miatt nagyon nehézkes az egyes berendezések eredményeinek összehangolása (Büchmann et al. 1995, Cowe et al. 1995, Hardy et al. 1995, Shenk et al. 1995).

Ettől eltérő, de szintén elterjedt technika a dielektromos tulajdonságokon alapul. Ezek a berendezések általában kevésbé pontosak, mint az infravörös nedvességmérők, viszont minden gabonafajta mérésére alkalmasak. A technológiájuk egyszerűsége miatt a berendezések ára kedvezőbb, és az egyéni mérőberendezések eredményeinek az összehangolása is egyszerűbb (Funk 1998). Az utóbbi 60 évben a dielektromos elven működő nedvességmérők váltak dominánssá a gabonakereskedelemben (Nelson 1977, Nelson 1991).

A dielektromos elven működő berendezések különböznek az alkalmazott frekvencia nagyságában. A legelterjedtebb berendezések a 20 MHz frekvencia körüli tartományban működnek. Mikrohullámú tartományban működő berendezéseket alkalmaznak nagymennyiségű áramló gabona nedvességmonitorozására. A mikrohullámú frekvencia előnye, hogy lehetséges sűrűségfüggetlen kalibrációk létrehozása, ezért alkalmas áramló gabonák mérésénél, ahol nem lehetséges a pontos halmazsűrűség mérése. A hátránya, hogy a mikrohullámú frekvenciákon a kötött víznek már nincs hozzájárulása a permittivitáshoz, így csak olyan nedvességű gabonák mérhetők, amelyek a kötött vizen kívül tartalmaznak szabad vizet (Sembery et al. 2001).

Az utóbbi években jelentek meg a 100 MHz feletti frekvenciatartományban működő nedvességmérők, amelyek a USDA-GIPSA által fejlesztett ún. UGMA (Unified Grain Moisture Algorithm – Egyesített Gabona Nedvességmérési Algoritmus) módszeren alapulnak (Funk et al. 2012). Ezen mérők pontossága és megfelelő ára miatt, 2012-től az Egyesült Államokban csak a nedvességmérők használata engedélyezett az exportra szánt gabona nedvességtartalmának meghatározásához (USDA-GIPSA 2012).

### **2.1.3 Zavaró hatások**

#### **2.1.3.1 Sűrűség**

A dielektromos gabona nedvességmérés eredményét a gyakorlatban számos zavaró hatás befolyásolja. A legjelentősebb a gabona halmazsűrűségének változékonysága, amely a különböző betöltések hatására jön létre. Ennek a hatásnak az alapja, hogy a relatív dielektromos állandó, amely a nedvességmérési eredményt határozza meg, a tesztcellában lévő víz abszolút mennyiségétől függ, viszont a nedvességtartalom a relatív vízmennyiségtől a minta tömegéhez képest (Nelson 1983).

E hibaforrás kiküszöbölésére a gyártók különböző stratégiákat használnak. A legegyszerűbb és legkevésbé hatékony, hogy feltételeznek egy általános sűrűséget minden gabonára. Ezek az úgynevezett “térfogatos” nedvességmérők érzékelik a meghatározott térfogatú gabona dielektromos tulajdonságát anélkül, hogy a minta tömegét megmérnék, és figyelmen kívül hagyják az ez által a nedvességtartalom meghatározásában okozott hibát. A második, valamivel jobb megközelítés, amikor egy olyan állandó tömegű minta dielektromos karakterisztikáját mérik, melynek a térfogata kisebb, mint a tesztcelláé. Ez utóbbi megoldással nagyobb pontosság érhető el, de mivel a sűrűség és a relatív dielektromos állandó között nem lineáris a kapcsolat, ezért a korrekciók ellenére ezek a nedvességmérők is rendszeres hibát adnak (Funk 1990, Trabelsi et al. 1998, Funk 1999, Funk et al. 2007). A kifinomultabb berendezésekben a dielektromos tesztcellát állandó térfogatú mintával töltik meg és megmérik a minta tömegét is. Ez lehetővé teszi, hogy matematikai sűrűségkorrekciót alkalmazzanak, azaz optimalizálják a nedvességmérő pontosságát nagyobb mintasűrűség tartományban (Nelson 1981). Ezek ellenére a nedves gabonaminta magas nedvességtartalma erősen csökkenti a nedvességmérés pontosságát (Nelson 1977, Nelson 1978, Funk 2001).

A sűrűség hatása a dielektromos tulajdonságokra még összetettebbé válik, amikor a vezetőképesség, az elektród polarizáció, a Maxwell-Wagner relaxáció hatását és a mérési frekvenciát is figyelembe vesszük. Funk 2001-ben végzett kutatásában megmutatta, hogy a vezetési hatások nagy szerepet játszanak gabona nedvességmérésben 100 MHz alatt. Az on-line nedvességmérő rendszerekben, amikor a tesztcellán keresztül folyik a gabona, ez még nagyobb kihívást jelent, mivel a minta sűrűségét ebben az esetben több különböző hatás befolyásolja, mint

például a mérendő mintára nehezedő gabona réteg nyomása vagy a vibráció a kombájnon (Funk 2001).

A mikrohullámú frekvenciatartományban, mivel a vezetési hatások elhanyagolhatók, lehetséges sűrűségfüggetlen kalibrációk létrehozása. Ennek az alapja, hogy a relatív dielektromos állandó és a veszteségi tényező bizonyos kifejezése jól korrelál a nedvességtartalommal (Kraszewski et al. 1999, Trabelsi et al. 2007, Trabelsi et al. 2008).

#### **2.1.3.2 Hőmérséklet**

A relatív dielektromos állandó függ a hőmérséklettől, ezért a mért nedvességtartalom jelentősen eltérhet a ténylegestől, amennyiben a minta hőmérséklete különbözik a kalibrációban alkalmazott minták hőmérsékletétől, és nem alkalmaznak hőmérséklet korrekciót. A nedvességmérési hiba megközelítően 0,1 %/°C. A hőmérséklet korrekció egy matematikai összefüggés, amellyel a nedvességmérési eredmény korrigálható. A relatív dielektromos állandó hőmérsékletfüggése nem lineáris széles hőmérséklettartományban, viszont a szobahőmérséklethez közeli tartományban a lineáris hőmérséklet korrekció elegendő. A hőmérséklet korrekciós tényező természetesen függ a mérőfrekvenciától, a gabonafajtól és bizonyos gabonák esetében a nedvességtartalomtól (Jones 1978, Nelson 1981, Lawrence et al. 1990, Trabelsi et al. 2006). A fagypont alatti nedvességmérés csak alacsony nedvességtartalmú minták esetén lehetséges, de akár mínusz 20 °C-ig (Mesaros et al. 2005).

#### **2.1.3.3 Beltartalom**

A becsült nedvességet a gabona beltartalma is befolyásolhatja, amely a minta növekedési körülményeitől és fajtájától függ. Egyik legjelentősebb példa erre a kukorica, amely esetén a korai fagy vagy szárazság miatt nem fejlődik ki táplálószövet és a szem sűrűsége rendkívül alacsony marad. Ez a nedvességmérésben a nedvesség jelentős alulbecslését eredményezi. Szója esetén korrelációt figyeltek meg a nedvességmérési hiba és az olajtartalom között (Brenner et al. 2011).

A nedvességmérési eredményekre jelentősen hat a mintában lévő törött szemek aránya is. E hatás kiküszöbölése érdekében a mérendő mintából, megfelelő szabványos szitával, el kell távolítani a törött szemeket (Hemeda et al. 1982, Federal Grain Inspection Service 1997).

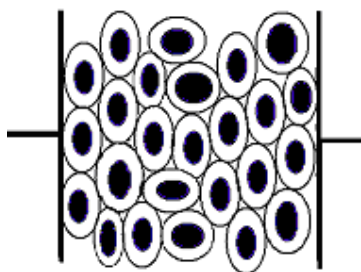
#### **2.1.3.4 Szemekben belüli egyenlőtlen nedvességeloszlás**

A gabonaszemekben belüli egyenlőtlen nedvességeloszlás kétféle módon jöhet létre. Az egyik, amikor a gabonaszemeket kívülről éri víz például eső, páralecsapódás vagy szándékos visszanedvesítés. A másik ennek ellentettje, mikor a gabona intenzív száradásnak van kitéve.

Mindkét esetben a gabonának azt az állapotát értjük, amikor még nem volt elegendő idő a nedvesség kiegyenlítésére.

A betakarított kukorica biztonságos tárolási nedvességtartalomra szárítása okozza a termelők egyik legjelentősebb kiadását. Ezt a költséget a szárítási folyamat on-line nedvességmérésével lehet csökkenteni. A szárítási folyamat közben a nedvességmérés pontatlanságának az egyik legjelentősebb oka a kukoricaszemeken belüli egyenlőtlen nedvességeloszlás (Montross et al. 1999, Kocsis et al. 2011).

Egy frissen szárított gabonaminta nedvességtartalmát pontosan nehéz mérni. Ha a mérésre közvetlenül a szárítóból való kivétel után kerül sor, a pontatlan hőmérsékletmérés is okozhat jelentős hibát. Ha a mintát engedjük mérés előtt szobahőmérsékletre lehűlni, ez az idő nem elég a magon belüli inhomogén nedvességeloszlás kiegyenlítésére, így a szemek belseje nedvesebb maradhat, mint a külső része, amelyet az 1. ábra szemléltet (Thorpe 1981).



1. ábra Inhomogén nedvességeloszlás magon belül, kapacitív mérőcellában

Több tudományos cikk is foglalkozik az egyenlőtlen nedvességeloszlás hatásaival, amelyek csak a hatás jelenlétére és a kiegyenlítés idejére vonatkoznak (Zimmerman 1976, Bye 1986). Ezekből megtudható, hogy a dielektromos elven működő nedvességmérők köztudottan alábecsülik a kiegyenlített minta nedvességtartalmát. Így a minta kiegyenlítés után mért nedvességtartalma várhatóan nagyobb, mint előtte. Ezt a jelenséget az angol nyelvű irodalomban “rebound”-hatásnak nevezik (Friesen et al. 1988). A nedvesség kiegyenlítés miatt jelentkező számított nedvességtartalom különbség egyes magoknál néhány nedvességszázalék is lehet (Funk 2001). A gabonatermelők kompenzálás végett a nedvességmérők által kijelzett nedvességnél szárazabbra szárítják a gabonát, ami amúgy nem lenne szükséges. Így ezáltal a szárításban többlet költség jelentkezik. A nedvesség kiegyenlítés jelenségének mélyebb ismerete nagyobb profitot eredményezhet a gabonaforgalmazóknak (Hemeda et al. 1982, Sokhansanj et al. 1988, Trabelsi et al. 2007).

### 2.1.3.5 Keverékek

Nedves és száraz gabona keveredése többféle okból történhet. A leggyakoribb eset a mesterséges keverés. A kukorica nedvességtartalmát pontosan mérni egyaránt kihívást jelent termelőnek, forgalmazónak és a nedvességmérőket gyártó cégeknek. A gabona felvásárlók a gabonáért kevesebbet fizetnek a termelőknek, ha annak nedvességtartalma nagyobb, mint az úgynevezett piaci nedvességtartalom, amely az Egyesült Amerikai Államokban például kukorica esetén 15,0-15,5 % közötti érték. Ennek az oka, hogy a tápértéket a száraz anyagra vonatkoztatják, azaz ugyanakkora tömegű, de nedvesebb kukoricában kevesebb a tápérték, mint ugyanannyi szárazabb gabonában. Másrészt a nedves kukoricával további költségek jelentkeznek, hiszen a biztonságos tároláshoz le kell szárítani 13 % nedvességtartalom alá ahhoz, hogy elkerüljék a mikrobiológiai és a kártevők miatt létrejövő romlást (Evans 1982). A termelők ugyancsak nem járnak jól, ha kukoricájuk kisebb nedvességtartalmú, mint a piacon elvárt, hiszen így alacsonyabb árat kapnak érte. Ezen okok miatt hatalmas a nyomás az eladókon, hogy terményüket a piaci nedvességtartalomhoz közeli értéken adják el. Másrészt ugyanez a piaci korlát hatalmas probléma azoknak, akiknek tárolniuk kell a kukoricát (Funk et al. 1996, Funk 1997).

Az Amerikai Egyesült Államokban a gabona visszanedvesítése illegális a gabonakereskedelemben, ezért termelők közvetlenül nem módosíthatják az eladásra szánt gabona nedvességtartalmát. Ehelyett a friss betakarításból származó, nedves kukoricát kevernek a tárolt, száraz gabonához. A nyereség maximalizálásához a keverék nedvességtartalmának minél jobban meg kell közelítenie a piaci, elvárt értéket. A megfelelő száraz-nedves gabona keveréket előállítani nem egyszerű. Először is a száraz és nedves gabona arányát kell pontosan beállítani. A kiindulási gabonák és a keverék nedvességtartalmát gyors nedvességmérőkkel, általában dielektromos elven működő mérőberendezésekkel ellenőrzik. A gabona nedvességmérőket a már kiegyenlített nedvességű gabonákra kalibrálják, emiatt a száraz-nedves keverék mért nedvességtartalma pontatlanná válik (Bonifacio-Maghirang et al. 1997, Funk 1998).

A vevőnek érdekében áll, hogy megtudja keverék-e a vásárolt gabona. Ha a száraz-nedves gabonakeverék nem egyenletes, az összekeverés nem volt elég alapos, akkor a nedvesebb gócekban romlási folyamatok indulhatnak el, mivel itt kedvezőbb a környezet a mikrobáknak. Nagytömegű keverék gabona szállításakor, ha a kukorica halmazt egy egyszerű kifolyócsővel töltötték be a vagonba vagy hajóba, a nedves és száraz magok hajlamosak szétválni. Míg a nedvesebb szemek a beöntési vonal közelében maradnak, addig a szárazabb szemek könnyebb tömegük miatt messzebb gurulnak el. Az így kialakuló nedvesség különbség akár 30%-os is lehet (Montross et al. 1999). A nem egyenletes keveredés miatt a kiegyenlítés lassabban jön létre, és romlási vonalak ún. forró



pontok alakulnak ki. Emellett a keverék gabonák minősége sok esetben rosszabb, mert tartalmazhat túlszártított gabonát (Zimmerman 1976, Bonifacio-Maghirang et al. 1997).

Számos tanulmány készült a gabonaminták nedvességtartalom eloszlásának vizsgálatára egyenáramú (DC) vezetőképességen alapuló kukoricaszem nedvességmérőkkel. Nelson és Lawrence (1990) szignifikáns különbséget mutatott ki a kukoricacsövek tetején és alján lévő szemek nedvességtartalma között. Számos megismételt mérés elvégzése után azt találták, hogy a kukoricacsövön lévő szemek nedvességtartalma közötti különbség elérheti a 7 %-ot is, amennyiben a minta átlagos nedvességtartalma 23 % körüli volt (Nelson et al. 1991). Maghirang és társai (1997) megvizsgálták a nedves-száraz kukorica keverék kiegyenlítődési sebességét. A keverékekben és a már kiegyenlítődött mintákban összehasonlították a penészgomba telepek növekedését. A tanulmány kimutatta, hogy a megfelelően összekevert nedves-száraz minta nedvesség kiegyenlítődése megtörténik az első 24 órában.

Számos módszert találtak arra, hogy a keverék mintákat azonosítsák. A legkézenfekvőbb az egy szem mérők alkalmazása. Ebben az esetben számos szem nedvességtartalmát kell egyenként megmérni, szárítószekrényes (Hart 1967) vagy vezetőképességen alapuló módszerrel (Martin et al. 1986, Pomeranz et al. 1986). Ezek a kutatások megmutatták, hogy a nedvességeloszlás egyértelműen mutatja a minta keverék mivoltát (Nelson et al. 1991). A mai napig nem létezik viszont olyan alkalmazott módszer, amellyel a keverék minták könnyen azonosíthatóak.

## 2.2 ELMÉLETI HÁTTÉR

### 2.2.1 Permittivitás

A permittivitás, annak a mértéke, hogy mennyire hat az elektromos tér egy szigetelő anyagra, és az anyag mennyire hat az elektromos térre. A külső elektromos tér hatására a szigetelő anyagban töltések mozdulnak el, és a külső térrel ellentétes elektromos teret hoznak létre. Ez a hatás figyelhető meg a kondenzátor lemezei közé helyezett anyag esetén. Mivel az anyagban létrejött elektromos tér ellentétes irányú a külső elektromos térrel, ezért ez csökkenti a külső elektromos tér nagyságát. Emiatt a hatás miatt lehet a kondenzátor lemezeken nagyobb mennyiségű töltést felhalmozni, ha nagy permittivitású anyagot helyezünk a lemezek közé. Az elektromos tér csökkenése a következő képlettel (2) írható fel:

$$E_k = \varepsilon_r \cdot E_b \quad (2)$$

ahol  $E_b$  a külső és az anyagban létrejövő elektromos tér eredője,  $E_k$  a külső elektromos tér nagysága,  $\varepsilon_r$  az anyag relatív permittivitása.

Ebben az esetben az anyagban energia tárolódik, amely a külső tér megszűnte után lead. A részecskék visszaállnak eredeti állapotukba. A komplex permittivitás valós részét a tudományos gyakorlatban relatív dielektromos állandónak nevezik, és dolgozatomban is így használom.

A relatív dielektromos állandó mérése történhet kondenzátor alkalmazásával. Ebben az esetben szükséges a kapacitás mérése, és a relatív dielektromos állandó a (3) képlettel számolható:

$$C = \varepsilon_r \cdot C_0 \quad (3)$$

ahol C a kondenzátor kapacitása abban az esetben, amikor tartalmazza a mérendő anyagot és  $C_0$  az üres tesztcella kapacitása.

Ha a külső elektromos tér időben változó tér, akkor az anyag tulajdonsága miatt elektromos energia veszteség figyelhető meg. Ennek az oka, hogy az anyagban létrejövő változás miatt, az anyag belső részecskéinek mozgása során hő keletkezik. Ezt használják ki a mikrohullámú melegítés során. Az anyag ezen tulajdonsága a permittivitás komplex számként való használatával és annak képzetes részével jellemezhető. A gyakorlatban a képzetes rész az energia megmaradás törvénye értelmében negatív. A permittivitás képzetes részének pozitív értékét a tudományos gyakorlatban veszteségi tényezőnek nevezik, és dolgozatomban is ekként fogom használni. A komplex permittivitás a következőképpen (4) írható:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'' \quad (4)$$

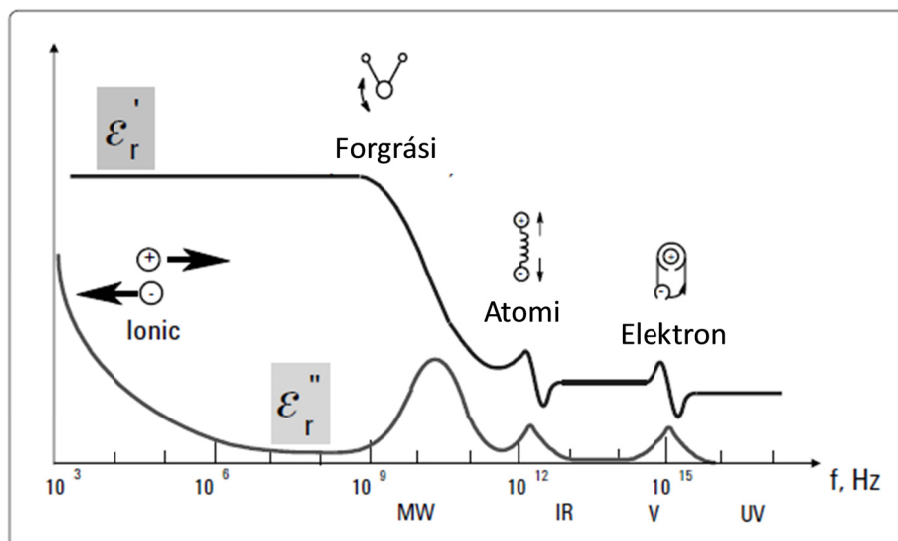
ahol  $\varepsilon^*$  a komplex permittivitás,  $\varepsilon'$  a permittivitás valós része és  $\varepsilon''$  a permittivitás képzetes része. A veszteségi tényező komplex impedanciás méréssel, egy párhuzamos kapacitív és rezisztív áramkörü modell segítségével az (5) képlettel számolható:

$$\varepsilon''_r = \frac{G}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0} \quad (5)$$

ahol G a rezisztív komponens vezetőképessége,  $C_0$  az üres tesztcella kapacitása és f az alkalmazott mérési frekvencia (Hasted 1973a).

### 2.2.2 A permittivitás frekvencia függése

A permittivitás értéke változik a frekvenciával. Ennek oka az anyag belső szerkezetében keresendő. A permittivitásért több mechanizmus is felelős, ahogy azt a 2. ábra is mutatja.



2. ábra Az anyag dielektromos tulajdonsága a frekvencia függvényében (forrás: Agilent Technologies 2006)

A dipólus orientáció és az ionos vezetés a domináns az időben állandótól a mikrohullámú frekvenciatartományig. Az atomi és elektron mechanizmusoknak relatív kicsi a hozzájárulásuk a relatív dielektromos állandóhoz a mikrohullámú tartományban és értékük állandó. Minden dielektromos mechanizmusnak van egy relaxációs frekvenciája. Ahogy a frekvencia növekszik, a lassabb mechanizmusok hozzájárulása megszűnik, és gyorsabb mechanizmusok járulnak hozzá a relatív dielektromos állandóhoz. Ez a frekvenciafüggés természetesen anyagfüggő. Az atomi és elektron átmeneteket rezonancia jelenségeknek, az ionos és forgásit relaxációs jelenségnek nevezzük (von Hippel 1995).

### 2.2.3 Orientációs polarizáció

A molekulákon, a nem egyenletes töltéeloszlás miatt, külső elektromos tér hatására forgatónyomaték ébred, amely annak elfordulását, a térrel megegyező irányú orientációját eredményezi. Természetesen, a hőmozgás és egyéb az anyagon belüli molekuláris erők miatt, ez az orientáció nem 100 %-os. A külső tér megszűnésével a molekulák ismételten teljesen rendezetlen állapotba kerülnek. A molekulák elfordulási készsége határozza meg a dielektromos hozzájárulásukat (Hasted 1973).

A komplex permittivitás (6), a relatív dielektromos állandó (7) és a veszteségi tényező (8) frekvencia függése az alábbi egyszerűsített, tapasztalati képletekkel írható le (Debye 1929):

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{\infty}}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau_r} \quad (6)$$

$$\varepsilon'_r = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}}{1 + j \cdot \omega^2 \cdot \tau_r^2} \quad (7)$$

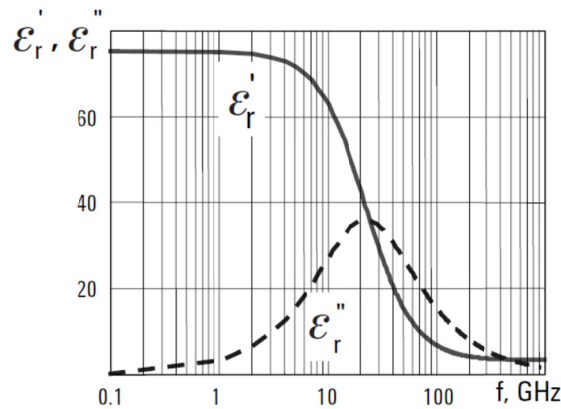
$$\varepsilon''_r = \frac{(\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}) \cdot \omega \cdot \tau_r}{1 + j \cdot \omega^2 \cdot \tau_r^2} \quad (8)$$

ahol  $\varepsilon_{r\infty}$  a relatív dielektromos állandó a végtelen nagy frekvencián,  $\varepsilon_{rs}$  a relatív dielektromos állandó nulla frekvenciánál,  $\omega$  a körfrekvencia ( $2 \cdot \pi \cdot f$ ) és  $\tau_r$  a relaxációs időállandó:

$$\tau_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_r} \quad (9)$$

ahol  $f_r$  a relaxációs frekvencia.

A 3. ábra a relatív dielektromos állandó és veszteségi tényező Debye-féle frekvencia függését mutatja:



3. ábra Debye relaxáció a frekvencia függvényében (forrás: Agilent Technologies 2006)

A veszteségi tényező maximuma a (10) képlettel számolható:

$$\varepsilon''_{r \max} = \frac{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}}{2} \quad (10)$$

#### 2.2.4 A vezetőképesség hozzájárulása a permittivitáshoz

A veszteségi tényező két mechanizmusból tevődik össze. Az egyik a bipoláris molekulák forgásából származó tényleges dielektromos veszteség, a másik az anyag egyenáramú vezetőképességéből adódó, a frekvenciával fordítottan arányos összetevő. Így a veszteségi tényező ( $\varepsilon''$ ) a Maxwell egyenletekből levezethető és a következőképpen írható (11):

$$\varepsilon'' = \varepsilon_{rd}'' + \frac{\delta}{\omega \cdot \varepsilon_0} \quad (11)$$

ahol  $\varepsilon_{rd}''$  a dielektromos veszteség,  $\delta$  vezetőképesség és  $\omega$  a körfrekvencia.

Az ionos vezetés csak a veszteségi tényezőben játszik szerepet. Alacsony frekvenciákon a vezetés hatása fordítottan arányos a frekvenciával és  $1/f$  meredekségű egyenesként jelenik meg a veszteségi tényező spektrumában (Hasted 1973a).

### 2.2.5 Felületi polarizáció

Ha a töltéshordozók az anyagban elmozdulhatnak, de valami miatt a vándorlásuk akadályoztatott, mint például egy szemcsés vezető anyag nem vezető mátrixban, akkor külső térerősség hatására a szabad töltések a szemcsékben elmozdulnak, és a határfelületeken felhalmozódnak, ezzel csökkentve az eredő elektromos teret és az effektív relatív dielektromos állandót. Ezt nevezik Maxwell-Wagner effektusnak. Az effektus frekvenciafüggésének jellege megegyezik a dipólus relaxáció frekvenciafüggésével, ezért nehéz eldönteni egy relaxációs jelenségről, mint a gabonák esetében, hogy kötött víz relaxációt tapasztalunk vagy Maxwell-Wagner hatást (von Hippel 1995a).

A Maxwell-Wagner relaxáció relaxációs frekvenciája számolható gömb részecskére egy adott mátrixban (12):

$$f_r = \varepsilon_0 \cdot \left( \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_m}{\varepsilon_1 + 2 \cdot \varepsilon_m} \right) \quad (12)$$

ahol  $\sigma_1$  a vezető részecske vezetőképessége,  $\sigma_m$  a mátrix vezetőképessége,  $\varepsilon_1$  a vezető részecske relatív dielektromos állandója és  $\varepsilon_m$  a mátrix relatív dielektromos állandója (Russel et al. 1989). A képlet is mutatja, hogy a vezető részecskék vezetőképességével nő a relaxációs frekvencia.

A kilohertzes frekvenciatartományban igen jelentős lehet az elektród polarizációs hatás. Ez azért jön létre, mert az elektródákhoz vándorló töltések, amelyek lehetnek ionok vagy protonok, nem képesek a fém elektródba távozni, így egy elektromos kettősréteg jön létre a gabonában az elektród közelében lévő felületen. Ez a jelenség az egyenáramtól a kHz-es frekvenciatartományig jelentkezik, és hatása jóval nagyobb lehet, mint a dielektromos vagy a Maxwell-Wagner relaxáció hatása (Foster et al. 1989, Kuang et al. 1998, Klein et al. 2006, Emmert et al. 2011).

Grimnes et al. (2000) számolt be hasonló jelenségről. Véleményük szerint, az elektród polarizációs frekvenciatartományban a teljes minta-elektrod rendszerben lévő vezetési hatások dominálják dielektromos spektrumot. A mintában a vezetés az ionok mozgása miatt jön létre. Funk (2001) feltételezése szerint ez valószínűleg "szivárgó" protonos vezetés. Az elektród felszínén és közelében a töltések mozgása, cseréje az ionok és az elektronok között történik. Ez a komplex

elektro-kémiai reakció a diffúzió által korlátozott és valószínűleg erősen frekvenciafüggő. Az ilyen komplex rendszer nem modellezhető ideális ellenállásokkal és kapacitásokkal, mert inkább elektrolitnak tekinthetők, mint dielektrikumnak. Ez a jelenség egy konstans fázisú elemként (Constant Phase Element) jelentkezik, melynek képe az Argand ábrákon egy egyenes (Grimnes et al. 2000, Funk 2001).

### 2.2.6 Keverék egyenletek és sűrűségkorrekció

A legtöbb esetben a mérni kívánt vagy mikrohullámú kezelést igénylő anyag nem homogén, hanem több különböző dielektromos tulajdonságokkal rendelkező anyag keveréke. Ez a helyzet az esetünkben vizsgált gabonákkal is, amelyek gabona magvak és levegő keveréke. Ezen dielektromos szempontból inhomogén anyagok eredő permittivitása valahol a legkisebb és a legnagyobb relatív dielektromos állandójú komponens értéke között van, de nem egyszerűen a komponensek permittivitásainak összege, hanem ennél jóval bonyolultabb összefüggés.

Számos kutatás folyt, elméleti és kísérleti módszerekkel, a dielektromos jellemzők és a minta sűrűsége közötti kapcsolatot leírására. Számos keverék összefüggést és ezek hatékonyságát határozták meg különböző anyagokra (Hasted 1973b, Kraszewski 1977, Nelson et al. 1990, Nelson 1992, Nelson 1996, Hilhorst 1998).

A gabonák esetében egyértelműen a Landau és Lifshitz (1960), majd Looyenga (1965) által publikált keverékformula bizonyult a legeredményesebbnek (Nelson 1983a). Ebben az összefüggésben (13) nem játszik szerepet a részecskék formája és orientációja:

$$\varepsilon^{\frac{1}{3}} = v_1 \cdot \varepsilon_1^{\frac{1}{3}} + v_2 \cdot \varepsilon_2^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

ahol  $\varepsilon$  a keverék permittivitása,  $\varepsilon_1$  és  $\varepsilon_2$  a komponensek permittivitása,  $v_1$  és  $v_2$  a komponensek relatív térkitöltése.

A nedvességmérés szempontjából nem közvetlenül a keverék formula hasznos. Ahogy azt már az előzőekben említettem, a nedvességmérés pontatlanságát leginkább a különböző betöltésekkor kialakuló különböző halmazsűrűség változékonysága eredményezheti. A dielektromos tulajdonságok és a térkitöltés között egyértelmű összefüggést nehéz megállapítani (Sembery 2002). Ennek oka, hogy a sűrűségkülönbségek származhatnak a gabonaminta jellemzőiből és a gabona betöltési módjától. Azaz a minta halmazsűrűsége függ a gabonamag sűrűségétől, formájától, felületének jellemzőitől, mint az érdesség és a ragadósság, a tesztcella alakjától és térfogatától és a minta betöltési sebességétől (Hlynka et al. 1959). Különbözik a minta tömörödöttsége akkor is, ha a tesztcella rázkódásnak van kitéve, vagy nyomás alatt van (Nelson 1981, Trabelsi et al. 2007). Ezért Nelson a keverékformulát továbbfejlesztette, annak

figyelembevételével, hogy a levegő relatív dielektromos állandója 1, létrehozott egy sűrűség transzformációt (14a). Ha egy adott gabonaminta sűrűsége és relatív dielektromos állandója ismert, akkor a relatív dielektromos állandó egy másik sűrűségi állapotban a (14a) összefüggéssel kiszámolható (Nelson 1983b, Nelson 1992, Nelson 2005):

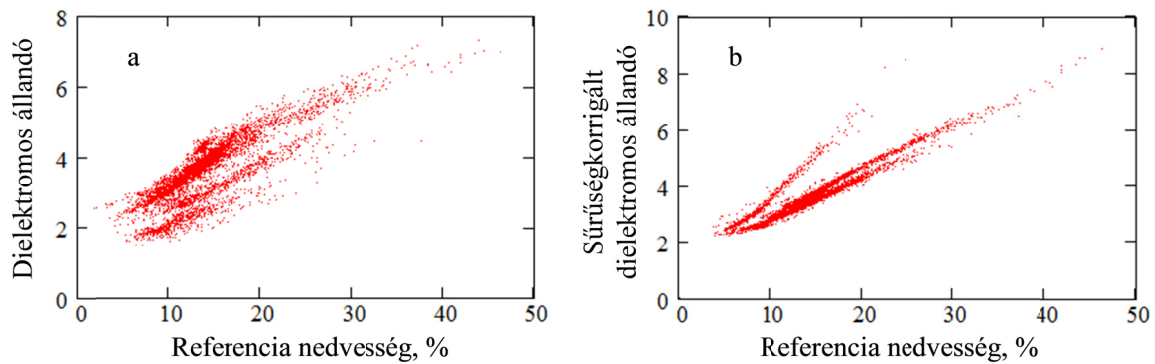
$$\varepsilon_2 = \left[ (\varepsilon_1^{\frac{1}{3}} - 1) \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} + 1 \right]^3 \quad (14a)$$

ahol  $\varepsilon_2$  a számolt relatív dielektromos állandó,  $\varepsilon_1$  a mért relatív dielektromos állandó,  $\rho_1$  a mért sűrűség és  $\rho_2$  egy tetszőleges gabonaminta sűrűség.

Funk (2001) megállapította, hogy (14a) összefüggés rendkívül hatékonyan működik mint sűrűségkorrekció (14b), ha minden minta relatív dielektromos állandóját egy adott célsűrűségegre transzformálja:

$$\varepsilon_{dc} = \left[ (\varepsilon^{\frac{1}{3}} - 1) \cdot \frac{\rho_0}{\rho} + 1 \right]^3 \quad (14b)$$

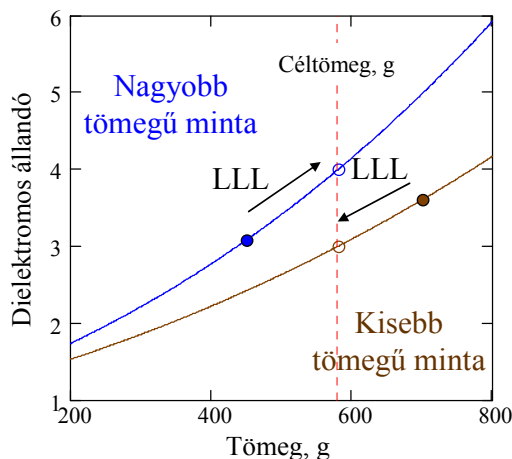
ahol  $\varepsilon_{dc}$  a sűrűségkorrigált relatív dielektromos állandó,  $\varepsilon$  a mért relatív dielektromos állandó,  $\rho$  a mért sűrűség és  $\rho_0$  a célsűrűség, amely  $686 \text{ kg/m}^3$  volt. Mivel a tesztcella térfogata állandó, ezért a sűrűségek helyett a minta tömegét és céltömeget használta (580 g). A sűrűségkorrekció eredményességét 15 amerikai gabona fajtán, közte kukoricára és szójára is, bizonyította magas frekvencián mért relatív dielektromos állandók esetén. A sűrűségkorrekció eredményességét a 4. ábra mutatja (Funk et al. 2007):



4. ábra A Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció hatása gabonamintákra;  
a: sűrűségkorrekció nélkül, b: sűrűségkorrekcióval

A 4. ábra alapján az látható, hogy az Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció (14b) alkalmazásával a nedvességtartalom és a relatív dielektromos állandó közötti összefüggésben az adatok csoportokba rendeződnek bizonyos gabonacsoportok szerint.

Az 5. ábra a Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció működését szemlélteti:



5. ábra A Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció működésének szemléltetése

Látható, hogy az Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció a különböző minták relatív dielektromos állandóját egy adott célsűrűséghez tartozó relatív dielektromos állandó értékére konvertálja. Ha a minta sűrűsége nagyobb, mint a célsűrűség, akkor a korrekciós egyenlet alkalmazása után számított relatív dielektromos állandó értéke kisebb lesz, mint a minta mért relatív dielektromos állandója. Ha a minta sűrűsége kisebb, mint a célsűrűség, akkor a korrigált relatív dielektromos állandóra nagyobb értéket kapunk, mint az eredetileg mért.

Munkámban a Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekciót (14b) a továbbiakban LLL sűrűségkorrekcióként használom.

### 2.2.7 Gabonaszemek orientációja

Nem gömbszimmetrikus gabonaszemek esetében a gabonaminta mérőcellába való betöltése nem csak a gabonahalmaz sűrűségére van hatással, hanem a gabonaszemek orientációjára is. Az orientáció függ a gabona fizikai tulajdonságaitól, a tesztcellába való betöltés irányától és a betöltés sebességétől. A gabonaszemek orientációs tendenciája sok esetben nem figyelhető meg, de a nedvességmérésben szignifikáns különbséget okozhat. A tesztcella falára merőlegesen elhelyezkedő gabonaszemek nagyobb relatív dielektromos állandót eredményeznek, mint a tesztcella falával párhuzamosan elhelyezkedő gabonaszemek. Ebből kifolyólag egy minden irányban egyenletes valószínűséggel álló gabonaszemeket tartalmazó gabonamintánál magasabb nedvességmérési eredményt fogunk kapni egy olyan betöltésre, amelynek hatására a tesztcella falára merőlegesen



álló gabonaszemek aránya nagyobb, és alacsonyabb nedvességmérési eredményt, ha a tesztcella falával párhuzamos szemek aránya növekszik meg. A gabonaszemek orientációs tendenciái önmagukban nem tesznek egy betöltést jobbá vagy rosszabbá, a mérési hiba akkor keletkezik, ha a betöltés módja változik, és nem történik korrekció ennek a hatásnak a korrigálására. Semelyik sűrűségkorrekció nem alkalmas a betöltés változatosságának tökéletes korrigálására, mert az adott véletlenszerűen kialakuló mintahalmazban nem ismert a gabonaszemek irányának mértéke. Két betöltési mód között empirikusan meghatározható korrekció. A korrekció nedvességtartalom függő, de a legtöbb gabonafajtára lineáris (Gillay 2010).

### **2.2.8 Gabonában lévő víz**

A víz szabad és kötött formákban van jelen a gabonában. A szabad víz, mely a mag makro- és mikropillárisaiban helyezkedik el magas hőmérsékleten könnyen eltávolítható. A kémiaiilag kötött víz csak az anyag roncsolása után vonható el. A víz ezen formája körülbelül 5-6 %-a gabona teljes tömegének (Serdyuk 2008). Mindezen kötött állapotokban a víztartalmak relatív dielektromos állandója különböző, de minden esetben kisebb, mint a szabad vízé.

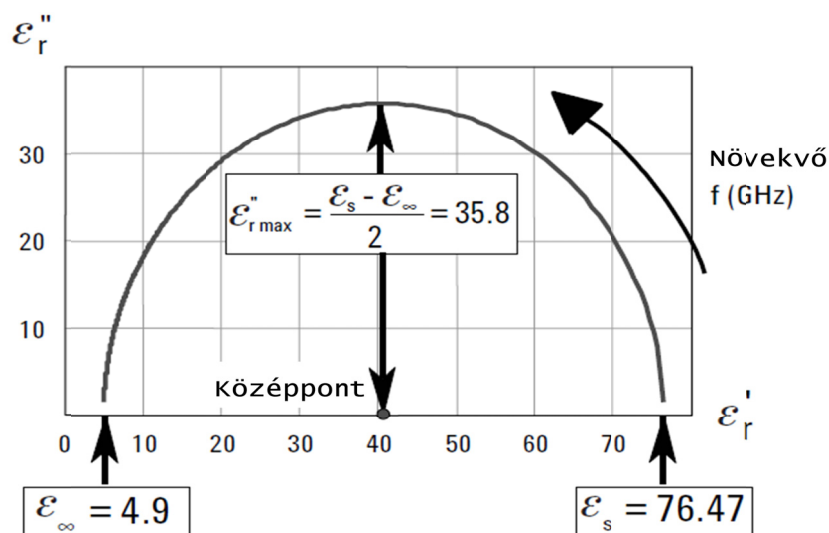
Sembery (1976) megállapította, hogy a természetes nedvességtartalmú és a mesterségesen nedvesített minták dielektromos tulajdonságaiban a nedvességkiegyenlítődés után nem tapasztalható számottevő különbség az általa vizsgált 50 kHz-50 MHz frekvenciatartományban.

### **2.2.9 Argand diagramos ábrázolás**

A gabonák dielektromos tulajdonságainak leírására az RF frekvenciatartományban a publikációk általában táblázatban rögzítik vagy grafikonokkal ábrázolják az impedancia, a relatív dielektromos állandó, veszteségi tényező, veszteségi tangens és az ac vezetőképesség frekvencia vagy nedvességtartalom függését (Nelson et al. 1975, Nelson et al. 1976, Sembery et al. 1999, Géczi et al. 2002). Ezek az adatok és ábrázolás módok hasznosak voltak általános igazságok megállapítására, azonban nem adtak elég fizikai betekintést a minták közötti különbségek igazi természetéről.

A permittivitás valós és képzetes részének frekvencia függvényében történő viselkedését sok esetben jobban meg lehet figyelni a Cole-Cole vagy más néven Argand diagramokon. Ez esetben a permittivitás valós részét a vízszintes tengelyen, a képzetes részét a függőleges tengelyen ábrázoljuk. Az ábrázolás hátránya, hogy az egyes pontokhoz tartozó frekvencia nem látható (Witten Jr et al. 1975).

A Debye által leírt relaxáció az Argand diagramos ábrázolással 6. ábrán látható:



6. ábra Debye relaxáció Argand diagram (forrás: Agilent Technologies 2006)

A komplex permittivitás valós és képzetes része közötti összefüggés félkörívként jelenik meg. Abban az esetben, amikor egy relaxációs mechanizmus játszik szerepet, akkor a kör középpontja az x tengelyre esik. A pont, ahol a félkörív jobb oldalon metszi az x tengelyt, a statikus relatív dielektromos állandónak felel meg. A félkörív baloldali metszéspontja a relatív dielektromos állandó végtelen frekvencián vett értéke. A távolság a legkisebb és a legnagyobb frekvencián lévő metszéspontok között a relatív dielektromos állandó csökkenés, mely a relaxációs hatások miatt jön létre. A körív sugara, ebben az esetben a körív legfelsőbb pontjának a távolsága az x tengelytől a veszteségi tényező maximumának az értéke. A maximum y értékhez tartozó frekvencia a relaxációs frekvencia (Agilent Technologies 2006).

Számos tiszta folyadék dielektromos viselkedése jól követi a Debye összefüggést, de a legtöbb anyagnál nem egy relaxációs idő van, hanem a relaxációs idők valamilyen eloszlás szerint változnak. Ha például két, kellő mértékben különböző relaxációs frekvencia van jelen, akkor két körív jelenik meg az ábrán. Ha egy relaxációs mechanizmus van jelen, de valamilyen okból számos kis mértékben különböző frekvencián, akkor, a megjelenő körív középpontja az x-tengely alatt található. Az ilyen rendszereket sok esetben a (6) egyenlethez hasonló (15) empirikus egyenlet (Cole et al. 1941) írja le:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}}{1 + (j \cdot \omega \cdot \tau)^{1-\alpha}} \quad (15)$$

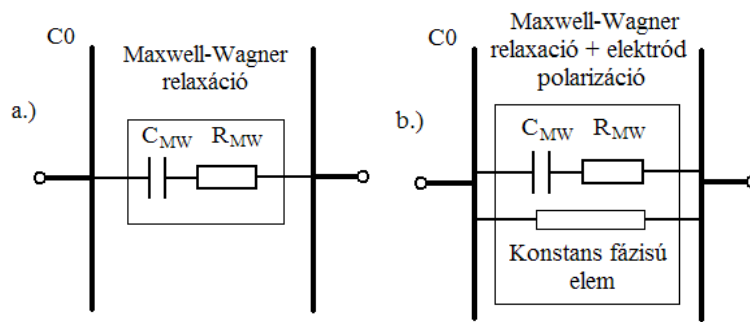
ahol  $\alpha$  az időállandó eloszlásának a paramétere. (Megjegyzés: ez az  $\alpha$  nem azonos a későbbiekben használt körív központi szögével.) A relaxációs idő eloszlási paraméter értéke 0 és 1 közé eshet és a relaxációs idő kiterjedését jellemzi.

### 2.2.10 Gabonaminták áramköri modellezése

A gabonaminta viselkedését nem lehet elektromos térlmélettel leírni, hanem szükség van fenomenológiai leírásra, amin keresztül a gabona dielektromos tulajdonságai megérthetők. Az egyik legkézenfekvőbb lehetőség elektromos komponensek használatával modellezni a gabona dielektromos viselkedését.

A szabad víz és kötött víz relaxációs frekvenciája nagyobb frekvenciákon van, mint az általam vizsgált frekvenciatartomány. A kutatásom fókusz a Maxwell-Wagner relaxáció és az elektród polarizáció volt. Ezek modelljét és viselkedését az továbbiakban mutatom be.

A Maxwell-Wagner relaxáció és elektród polarizáció áramköri modellje a 7. ábrán látható:



7. ábra a.) Maxwell-Wagner relaxációjának áramköri helyettesítő modellje egy  $C_0$  kapacitású kondenzátorban, b.) Elektród polarizáció és Maxwell-Wagner relaxáció áramköri helyettesítő modellje egy  $C_0$  kapacitású kondenzátorban

A Maxwell-Wagner relaxáció modellje a következőképpen (16) számolható a soros modell alapján:

$$Z_{MW}^* = R_{MW} + \frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{MW}} \quad (16)$$

ahol  $R_{MW}$  és  $C_{MW}$  a Maxwell-Wagner relaxáció modelljének ellenállása és kapacitása,  $f$  a frekvencia. Mivel amit mérünk, azt modellezzük, így a mért impedancia egyenlő a modellezett impedanciával:

$$Z_m^* = Z_{MW}^* \quad (17)$$

ahol  $Z_m$  a mért impedancia és  $Z_{MW}$  a modellezett impedancia. A továbbiak egyszerűbben írhatók, ha bevezetjük a mért komplex admittanciát ( $Y_m^*$ ):

$$Y_m^* = \frac{1}{Z_m^*} \quad (18)$$

Így a relatív dielektromos állandó a következőképpen számolható:

$$\varepsilon'_r = \frac{Y''_m}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0} \quad (19)$$

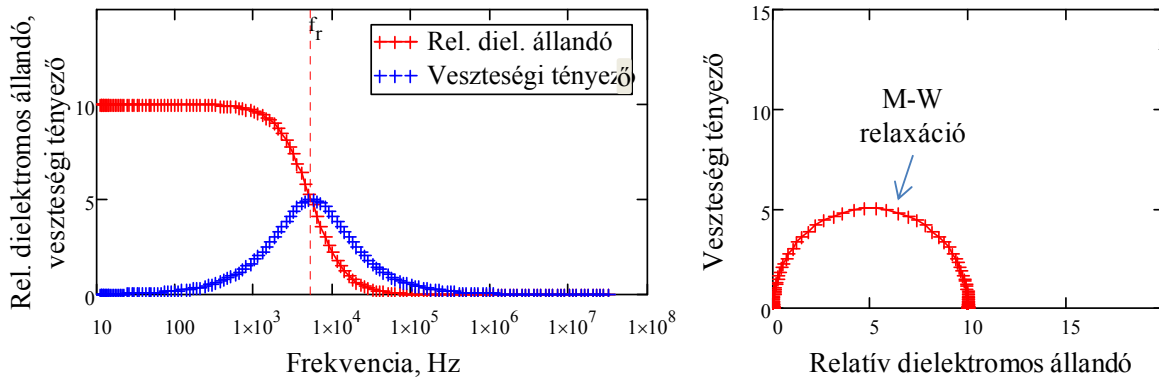
ahol  $Y''_m$  a mért admittancia képzetes része,  $C_0$  az üres kondenzátor kapacitása. A veszteségi tényező a következő képlettel számolható:

$$\varepsilon''_r = \frac{Y'_m}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0} \quad (20)$$

ahol  $Y'_m$  a mért admittancia valós része. A relaxációs frekvencia ( $f_m$ ) az alábbi képlettel számolható:

$$f_r = \frac{1}{R_{MW} \cdot C_{MW} \cdot 2 \cdot \pi} \quad (21)$$

A csak az ábrázolás kedvéért  $R_{MW}=10^6$  ohm,  $C_{MW}=30$  pF és  $C_0=3$  pF tetszőleges értékekkel a szimuláció eredménye a 8. ábrán látható:



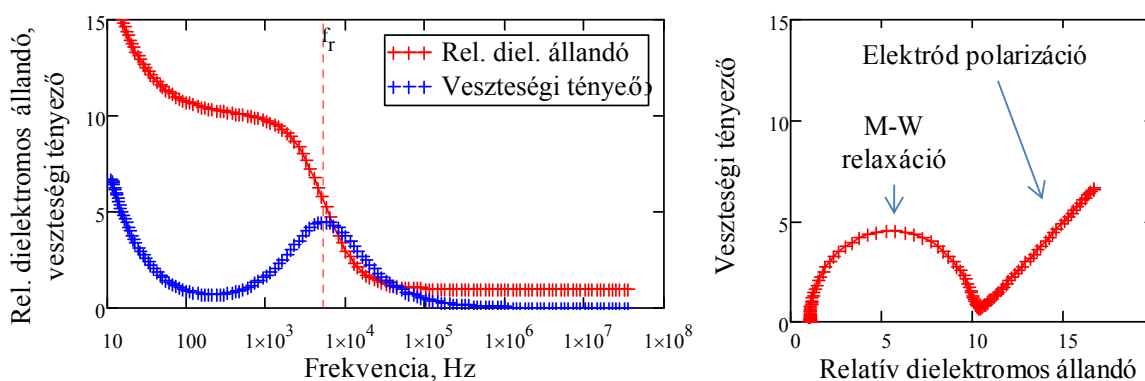
8. ábra A Maxwell-Wagner relaxáció szemléltetése a frekvencia függvényében és Argand diagramon (forrás: Gillay)

Az ábrán látható, hogy a Maxwell-Wagner relaxáció hasonló lefutást mutat, mint a dielektromos relaxáció, az egyetlen megfigyelhető különbség, hogy a végtelen frekvencián a dielektromos hozzájárulás nulla.

Az elektród polarizáció egy párhuzamosan kapcsolt konstans fázisú elemként vehető figyelembe az alábbi módon (22):

$$Z^*_m = Z^*_{MW} - j \cdot Z_{ep} \cdot e^{j \cdot \theta_{ep}} \quad (22)$$

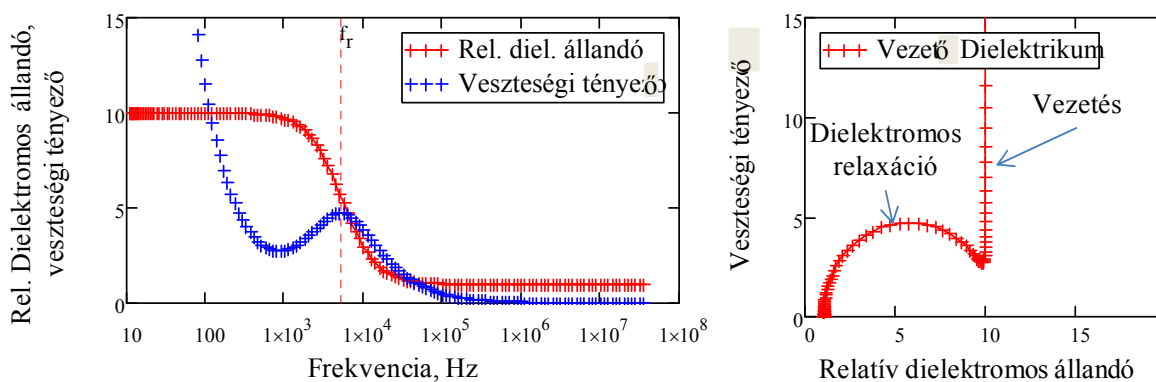
ahol  $Z_{ep}$  elektród polarizáció miatt kialakuló impedancia (valós szám),  $\theta_{ep}$  a fázistolás mértéke. Az ábrázoláshoz  $Z_{ep}=5 \cdot 10^8$  ohm és a  $\theta_{ep}=\pi/4$  tetszőleges értékkel, a (17-20) képleteket alkalmazva a szimuláció eredménye a 9. ábrán látható:



9. ábra Az elektród polarizáció szemléltetése a Maxwell-Wagner relaxációval együtt a frekvencia függvényében és Argand diagramon (forrás: Gillay)

A 9. ábrán jól látható a relatív diektromos állandó és veszteségi tényező gyors emelkedése a nulla frekvenciát közelítve. Az Argand ábrán megjelent az elektród polarizációt jelző egyenes szakasz.

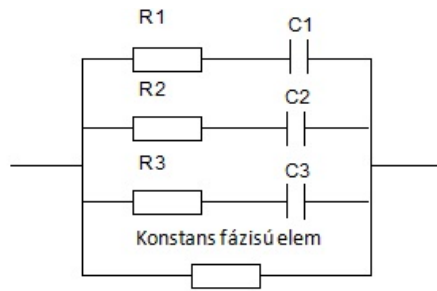
Az elektród polarizációval szemben az ionos vezetés hatása különböző, ami a 10. ábrán látható. A szimuláció hasonlóan történt, mint az előzőkben. A permittivitás Debye-féle frekvencia függése egy  $10^{-8}$  Sm/m vezetőképességből adódó veszteségi tényezővel lett növelve.



10. ábra Vezető dielektrikum permittivitásának szemléltetése a frekvencia függvényében és Argand diagramon (forrás: Gillay)

Jól látható, hogy az ionos vezetés nem hat a relatív diektromos állandóra, csak a veszteségi tényező értékét növeli, és az Argand ábrája egy függőleges egyenest tartalmaz, és nem egy  $90^\circ$ -nál kisebb szöget bezáró egyenest, mint az elektród polarizáció esetében (von Hippel 1995b).

Mivel a diektromos relaxációkat is egy sorosan kapcsolt kapacitás és ellenállásként lehet modellezni Funk a 11. ábrán látható áramkörti modellt javasolta a gabona modellezésére, amely megjeleníti a fő relaxációs jelenségeket a kis frekvenciáktól a nagyobb felé haladva: elektród polarizáció, Maxwell-Wagner relaxáció és a vízmolekulák diektromos relaxációja.



11. ábra A tesztcellában lévő gabona egyszerűsített helyettesítő áramköre. R1 és C1 reprezentálja a szabad víz, R2 és C2 a kötött víz relaxációját. R3 és C3 reprezentálja a Maxwell-Wagner relaxációt és a konstans fázisú elem az elektród polarizációt jelképezi.

Egy passzív elektromos hálózat nagymértékben egyszerűsíthető kivéve az állandó fázisú elemet, melyet nem lehet megjeleníteni fizikailag megvalósítható kapacitások és ellenállások kombinációjával (Hasted 1973a, Funk 2001).

## 2.3 AZ IRODALOM ÖSSZEFOGLALÁSA

Az irodalom kutatása során bizonyossá vált, hogy az LLL keverék egyenlet és sűrűségkorrekció írja le leghatékonyabban a gabonák viselkedését. A gyakorlati életben több olyan körülmény is előfordul, ami kérdésessé teheti az LLL sűrűségkorrekció hatékonyságát. Ilyen az on-line alkalmazásokban a gabonaoszlop által okozott nyomás, vagy egy berendezés vibrációja.

Továbbá felmerült a kérdés, hogy a különböző mintatartó kialakításoknál, például hengerkondenzátornál vagy síkkondenzátornál azonos módon működik-e az LLL sűrűségkorrekció. Ez azért lehet kérdés, mert míg a síkkondenzátorban közel homogén az elektromos tér, addig a hengerkondenzátorban erősen inhomogén.

Az inhomogén nedvességeloszlás által okozott nedvességmérési hibák széles körben ismertek, de kimerítő kutatás még nem született e hatások vizsgálatára 100 MHz alatti frekvenciatartományban.

Az Argand diagramos ábrázolás és áramköri modellek alkalmasak lehetnek a gabona viselkedésének megjelenítésére és megértéséhez.

### 3 CÉLKITŰZÉSEK

Munkám két fő témakörre összpontosult. Az első témaköröm a betöltési módok és a nyomás hatásának vizsgálata volt. A másodikban az inhomogén nedvességeloszlás dielektromos jellemzőkre gyakorolt hatását vizsgáltam meg. Doktori munkám célja az alábbi kérdések megválaszolása volt:

#### **A BETÖLTÉSI MÓDOK ÉS A NYOMÁS HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA**

1. A betöltési módok és a nyomás hatással vannak-e:
  - a. a gabonák dielektromos jellemzőire,
  - b. az LLL sűrűségkorrekció hatékonyságára,
  - c. a gabonák nedvességtartalmának meghatározására?
2. A mérőcella kialakítása befolyásolja-e az LLL sűrűségkorrekció hatékonyságát?
3. Az egyes betöltési módok és a nyomás eltérően hatnak-e a gabona dielektromos jellemzőire?

#### **AZ INHOMOGÉN NEDVESSÉGELOSZLÁS HATÁSA**

##### **A szemeken belüli egyenlőtlen nedvességeloszlás vizsgálata**

4. A szemeken belüli inhomogén nedvességeloszlás okoz-e szignifikáns különbséget a kukorica dielektromos jellemzőiben és ebből következően a számított nedvességtartalom értékekben? A jelenségre van-e befolyása a mérőfrekvencia megválasztásának?
5. Mekkora a számított nedvességtartalom különbség a kiegyenlített és az inhomogén nedvességeloszlású minta között különböző nedvességtartalomnál és mérőfrekvencián?
6. Lehetséges-e dielektromos módszerrel megkülönböztetni a kiegyenlített és az inhomogén nedvességeloszlású szemeket tartalmazó gabonamintákat?

##### **Száraz-nedves gabonakeverékek vizsgálata**

7. A szemek közötti egyenlőtlen nedvességeloszlás okoz-e szignifikáns különbséget a dielektromos jellemzőkben és ebből következően a számított nedvességtartalom értékekben? A jelenségre van-e befolyása a mérőfrekvencia megválasztásának?
8. Mekkora a száraz-nedves kukoricakeverékek kiegyenlítés előtti és utáni számított nedvességtartalom különbsége különböző nedvességtartalmon és keverési arányok mellett?
9. Lehetséges-e dielektromos módszerrel megkülönböztetni a száraz-nedves gabonaszemek keverékéből álló mintát a már kiegyenlített, egyenletes nedvességeloszlású mintától?





## 4 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

### 4.1 ANYAGOK

Vizsgálataimhoz kukoricát és szóját használtam. A kukoricaszemek mérete, alakja és nedvességtartalmának széles határok közötti előfordulása megnehezíti a dielektromos méréseket. A szójára a közel gömb alakja és a dielektromos tulajdonságai miatt esett választásom.

A Fizika-Automatika Tanszéken végzett méréseimhez kézi és gépi betakarítású Pioneer hibrid kukoricát használtam. A nagy nedvességtartalmú kukoricacsöveket kézzel morzsoztam. A romlási folyamatok elkerülése miatt a mintákat felhasználásig 4-6 °C hőmérsékleten tároltam. A mintákat a kísérletek előtt légmentesen lezárt, műanyag zacskóban kiterítve hagytam szobahőmérsékletre (20-22°C) felmelegedni. Minden mérés előtt megmértem a minta hőmérsékletét, a hőmérséklet korrekció elvégzése céljából. A minták nedvességtartalmát a magyar szabvány (MSZ6367/3-83) által előírt szárítószekrényes mérésekkel határoztam meg. A száraz-nedves keverékek kísérleteihez használt visszanedvesített kukorica mintákat a 13,1 %-os száraz kukorica és a kívánt 18, 20, 25, 30 %-os nedvességtartalom eléréséhez szükséges analitikai pontossággal beállított desztillált víz hozzáadásával készítettem. A mintákat légmentesen zárható, műanyag tartókban tároltam 4-6 °C hőmérsékleten 1 hétig, naponta 3-szor átmozgatva. A visszanedvesített minták nedvességtartalmát Burrows 700 nedvességmérővel ellenőriztem, felhasználás előtt.

Az USDA-GIPSA-nál végzett kísérleteket 11,2 - 35,2 % közötti nedvességtartalmú kukoricákkal és 9-18 % közötti nedvességű szóján végeztem. A minták az USDA-GIPSA 2010. évi felméréséből, az Amerikai Egyesült Államok (továbbiakban USA) teljes területéről származtak. A gabonák nedvességtartalma az amerikai gyakorlatnak megfelelő szárítószekrényes mérésekkel lett meghatározva (Wilhelm et al. 2004).

A relatív dielektromos állandóból a nedvesség kalibrációs összefüggés segítségével számítottam ki a nedvességtartalmat (a továbbiakban számított nedvességtartalom). A nedvesség kalibráció az USDA GIPSA 1999. évi felméréséből származó 236 kukorica minta felhasználásával készült. A kukoricaminták nedvességtartalma 10-35 % közötti volt.

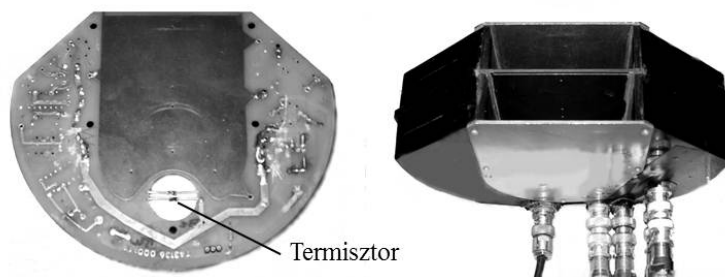
### 4.2 ALKALMAZOTT TESZTCELLÁK

A vizsgálataim során három tesztcellát, két síkkondenzátor típusú mérőcellát és egy hengerkondenzátort két eltérő kialakítással (középső elektród toldással vagy nélkül) alkalmaztam. Ezek a tesztcella kialakítások széles körben elterjedtek a dielektromos gabona nedvességmérők piacán.

Egy adott tesztcellán, a benne lévő gabonával, közvetlenül csak az impedanciát tudjuk mérni, viszont ez nem független a mérőcella geometriájától, így nem lehet általános következtetéseket levonni. Szükséges egy olyan paraméter, amely csak a gabonára jellemző a cellától függetlenül. Természetesen adódott a permittivitás használata, amely a legújabb kutatások szerint is a legjobb alap a nedvesség meghatározásához, főleg azért mert ezen alkalmazható a Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció. Ennek érdekében meg kellett határozni a tesztcellák fizikai modelljét, amellyel a mért gabonaminta permittivitása számolható.

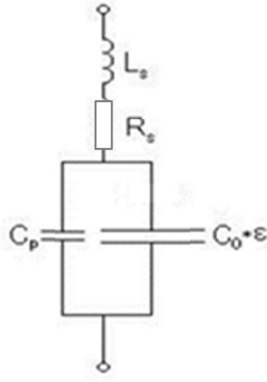
#### 4.2.1 GAC tesztcella

A Fizika-Automatika Tanszéken történt mérésekhez egy módosított DICKY-john GAC 2100 tesztcellát használtam (Funk et al. 1978). A tesztcellára a továbbiakban GAC tesztcellaként hivatkozom. A tesztcella és az LRC precíziós mérők közötti kapcsolat koaxiális kábeleken keresztül történik BNC csatlakozókkal amelyek a tesztcella külső és belső elektródok kivezetéseihez voltak forrasztva (12. ábra).



12. ábra GAC tesztcella központi elektródja és az összeszerelt tesztcella

A középső elektród aranyozott vörösrézlemez, a két külső elektród eloxált alumínium. Az elektródák közötti távolság 25,4 mm, az “aktív” elektróda területe 0,013 m<sup>2</sup>. A tesztcella fizikai modellje (13. ábra) segítségével a mért párhuzamos kapacitás ( $C_m$ ) és a vezetőképesség ( $G_m$ ) értékeiből a komplex permittivitás ( $\epsilon^*$ ), a relatív dielektromos állandó ( $\epsilon'_r$ ) és a veszteségi tényező ( $\epsilon''_r$ ) kiszámolható, melyek ismeretében és a nedvesség kalibrációs összefüggés használatával meghatározható a gabonaminta nedvességtartalma.



13. ábra A síkkondenzátor tesztcella helyettesítő áramköre

A tesztcella komplex impedanciája ( $Z^*$ ) a mért párhuzamos kapacitás ( $C_m$ ) és a vezetőképesség ( $G_m$ ) segítségével (23):

$$Z^* = (G_m + j \cdot \omega \cdot C_m)^{-1} \quad (23)$$

ahol  $Z^*$  a komplex impedancia,  $G_m$  a mért vezetőképesség és  $C_m$  a mért kapacitás. A komplex impedanciát felírva a 13. ábrán látható modell paramétereinek segítségével:

$$Z^* = [j \cdot \omega \cdot (C_p + C_0 \cdot \epsilon^*)]^{-1} + R_s + j \cdot \omega \cdot L_s \quad (24)$$

ahol  $L_s$  a vezetékek soros induktivitása,  $R_s$  a vezetékek soros ellenállása,  $C_p$  a párhuzamos szórt kapacitás,  $C_0$  az üres tesztcella kapacitása, melyet a geometriai adatokból határoztam meg (4.5 pF),  $\epsilon^*$  a komplex permittivitás,  $j$ , képzetes egység és  $\omega$  a körfrekvencia. A (24) egyenletből kifejezve a komplex permittivitást ( $\epsilon^*$ ) (25), majd ebből meghatározható a relatív dielektromos állandó ( $\epsilon_r'$ ) (26):

$$\epsilon^* = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r' - j \cdot \epsilon_r'') = \frac{-\omega \cdot C_p \cdot (Z^* - R_s - j \cdot \omega \cdot L_s) - j}{\omega \cdot C_0 \cdot (Z^* - R_s - j \cdot \omega \cdot L_s)} \quad (25)$$

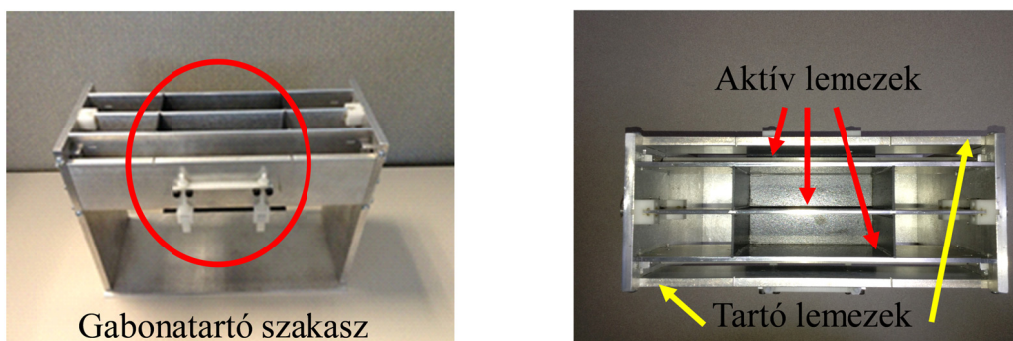
$$\epsilon_r' = \text{Re} \left[ \frac{-\omega \cdot C_p \cdot (Z^* - R_s - j \cdot \omega \cdot L_s) - j}{\epsilon_0 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot (Z^* - R_s - j \cdot \omega \cdot L_s)} \right] \quad (26)$$

A modell paramétereinek meghatározását Funk (2002) végezte. A tesztcellák desztillált vízzel való feltöltése után a modell paramétereinek beállítása úgy történt, hogy a desztillált víz mért és az irodalomban publikált permittivitása között optimális legyen az egyezés. A desztillált víz ( $\epsilon_r' = 78,5$ , 20 °C-on) és a levegő ( $\epsilon_r' = 1,00$ ) irodalmi adatainak megfelelően a meghatározott

modell paraméterek:  $C_p = 5,9 \text{ pF}$ ,  $R_s = 2,5 \text{ } \Omega$ ,  $L_s = 27,5 \text{ nH}$ . Ezen összefüggések alkalmazásával a mért adatokat a tesztcella típusától független permittivitássá konvertálható.

#### 4.2.2 UGMA tesztcella

Az USDA-GIPSA-nál lehetőségem nyílt arra, hogy a 2012-ben az Amerikai Egyesült Államokban bevezetett, hivatalos nedvességmérési technológia alapjául szolgáló ún. mester tesztcellák közül az egyiket a használhassam. A mérési technológia neve után Unified Grain Moisture Algorithm (egyesített gabona nedvességmérő módszer), rövidítve UGMA, a továbbiakban az UGMA tesztcella megnevezést használom (14. ábra).



14. ábra A UGMA tesztcella oldal- és felülnézetben

Az UGMA tesztcella 3,2 mm vastag, párhuzamos alumínium lemezekből épül fel. A tesztcella aktív része a középső elektród lemezből és a mellette párhuzamosan elhelyezkedő két másik lemezből áll. Az ezekkel párhuzamos külső, vastagabb lemezek csak a mechanikai stabilitást szolgálják. Az elektród lemezek közti távolság  $27,7 \pm 0,1 \text{ mm}$ , a magasságuk 76,2 mm és a hosszuk 245 mm volt. A gabona a tesztcella középső 101,7 mm hosszú részében helyezhető el, és egy nyitható műanyag ajtó tartja a gabonát alulról a cellában. A tesztcella térfogata 430,16 ml. A tesztcella két végén N-típusú csatlakozók találhatók, amelyeknek középső része a tesztcella középső lemezéhez, a külső részük a két szélső aktív lemezhez csatlakozik. (Funk et al. 2010)

A méréseim 100 MHz alatti frekvenciatartományban történtek, ezért a tesztcellát úgynevezett nyitott módban használtam, azaz a tesztcella végén nem volt záró impedancia elem. Arelatív dielektromos állandót a (27) képlettel lehet meghatározni:

$$\varepsilon'_r = \frac{C_m - C_s}{C_0} \quad (27)$$

ahol  $C_m$  a gabonamintát tartalmazó kondenzátor mért kapacitása,  $C_s$  a szórt kapacitás, amely jelen van minden nem ideális kondenzátor esetében, és  $C_0$  a gabonatartó szakasz számolt kapacitása. A (27) képlet tényezői részletezve:

$$C_m = \frac{Y''_m}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (28)$$

ahol  $Y''_m$  a mért komplex impedancia reciprokának a képzetes része és  $f$  a mérési frekvencia.

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{A \cdot 2}{d} \cdot 1,04 \quad (29)$$

a tesztcella gabonatartó részének a számolt kapacitása, ahol  $\varepsilon_0$  a vákuum permittivitása, amely  $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m,  $A$  tesztcella gabonatartó részének a felülete,  $d$  a lemezek távolsága és 1,04 a korrekciós tényező, amely kalibrációval lett meghatározva. A tesztcella számítással meghatározott elméleti kapacitása  $C_0 = 5,139$  pF. Továbbá

$$C_s = C_{m0} - C_0 \quad (30)$$

$$C_{m0} = \frac{Y''_{m0}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (31)$$

ahol  $C_{m0}$  az üres tesztcella mért kapacitása, ahol  $Y''_{m0}$  az üres tesztcella mért komplex impedancia reciprokának képzetes része.

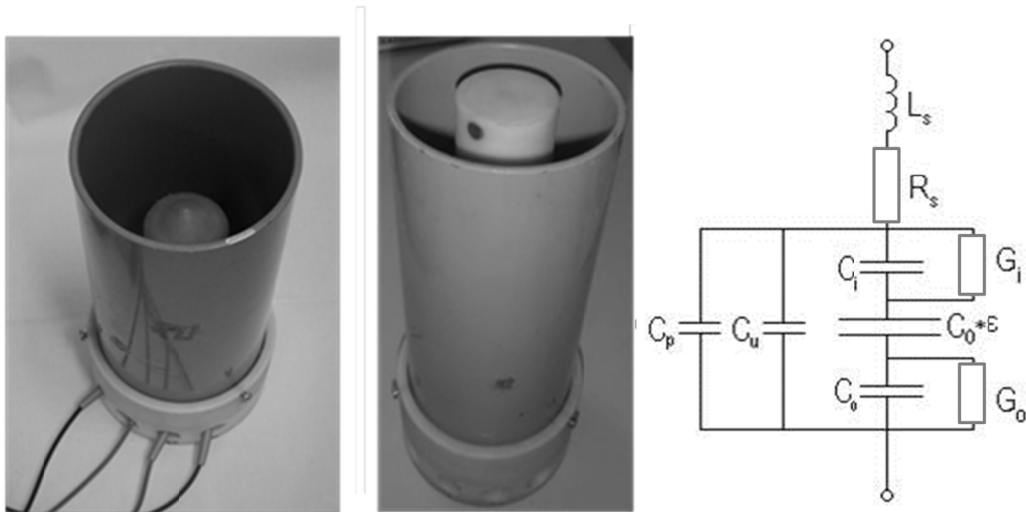
A veszteségi tényező számolása a (32) képlettel történik.

$$\varepsilon''_r = \frac{Y'_m}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0} \quad (32)$$

ahol  $Y'_m$  a mért komplex impedancia reciprokának a valós része. (Funk et al. 2010)

### 4.2.3 Hengerkondenzátor

Méréseimhez egy hengerkondenzátort használtam, amelynek központi elektródja az eredmények ismeretében meg lett hosszabbítva egy szigetelő toldattal. E szigetelő toldat a tesztcella elektromos szempontból inaktív részében található, hatása elhanyagolható, a tesztcella áramköri modelljét nem változtatja meg. A továbbiakban a toldattal rendelkező hengerkondenzátorra, mint módosított hengerkondenzátor hivatkozom. A hengerkondenzátor tesztcella külső elektródjának átmérője 91,4 mm, magassága 191,5 mm. A belső, központi elektródjának átmérője 42,5 mm, magassága 119,5 mm. Mindkét elektród felszíne festékkal bevont. A 15. ábrán a hengerkondenzátor, a módosított hengerkondenzátor és az áramköri modellje látható.



15. ábra A hengerkondenzátor, a módosított hengerkondenzátor tesztcella és áramköri modellje

A tesztcellák komplex impedanciája,  $Z^*$  a (33) egyenlettel írható fel:

$$Z^* = \left[ \left[ \left( \frac{1}{G_{be} + j\omega \cdot C_{be}} + \frac{1}{G_{ke} + j\omega \cdot C_{ke}} + (j\omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon^*)^{-1} \right) \right]^{-1} + j\omega \cdot (\varepsilon^* \cdot C_{in} + C_p) \right]^{-1} + R_s + j\omega \cdot L_s \quad (33)$$

ahol  $L_s$  a vezetékek soros induktivitása,  $R_s$  a vezetékek soros ellenállása,  $C_p$  a párhuzamos szórt kapacitás,  $C_{in}$  a belső elektród feletti inaktív rész kapacitása,  $C_{be}$  belső elektród kapacitása,  $G_{be}$  a belső elektród vezetőképessége,  $C_{ke}$  a külső elektród kapacitása,  $G_{ke}$  a külső elektród vezetőképessége,  $C_0$ : az üres tesztcella kapacitása,  $\varepsilon^*$  a komplex permittivitás,  $\omega$  a körfrekvencia.

A GAC tesztcellánál ismertetett módon határozhatók meg a modell paraméterei:  $C_p = 2,8 \text{ pF}$ ,  $R_s = 2,2 \text{ } \Omega$ ,  $L_s = 43 \text{ nH}$ .

### 4.3 AZ IMPEDANCIA MÉRÉSE

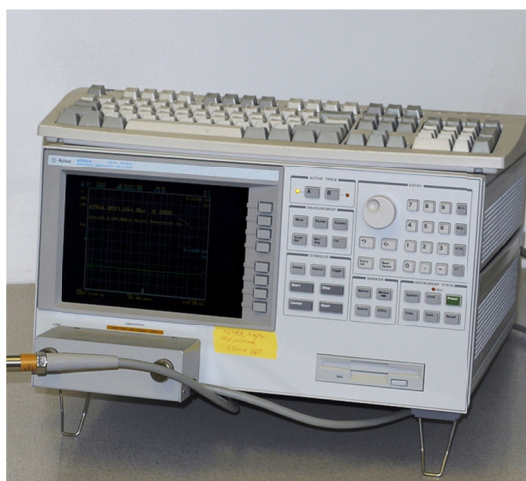
A Fizika-Automatika Tanszéken a dielektromos méréseket 100 Hz-től 28,1 MHz-ig terjedő frekvenciatartományban végeztem. A gabonaminták dielektromos spektrumát 100 Hz és 800 kHz között egy HP-4284A és a 79,4 kHz és 28,1 MHz között egy HP-4285A precíziós LRC mérővel vettem fel (16. ábra).



16. ábra HP-4284A és HP-4285A precíziós LRC mérők

A két készülék által mért frekvenciatartományok 79,4 kHz-800 kHz között átlapolódnak. Mindkét berendezés az automatikus kiegyenlítő híd technológiával méri az impedanciát. (Hewlett-Packard, 1996). A tesztcella négy koaxiális kábellel kapcsolódott a HP-4284A precíziós LRC impedancia mérőhöz. Az impedancia mérőt GPIB-n (General Purpose Interface Bus) keresztül vezéreltük számítógép segítségével. A párhuzamos kapacitást és vezetőképességet a 31 Hz - 800 kHz frekvenciatartományban mértük 45 ponton, logaritmikus felosztásban. A HP-4285A precíziós impedancia mérővel a 79,4 kHz – 28,1 MHz frekvenciatartományban mértünk.

Az Amerikai Egyesült Államokban a 17. ábrán látható Agilent 4294A impedancia mérő segítségével határoztuk meg a gabonaminták dielektromos karakterisztikáját 100 Hz és 100 MHz frekvencia között.



17. ábra Agilent 4294A impedancia mérő

#### 4.4 A SZÁMÍTOTT NEDVESSÉGTARTALOM MEGHATÁROZÁSA

Ahhoz, hogy meghatározzam a méréseim során talált szignifikáns különbségek a dielektromos jellemzők értékeiben mekkora nedvességtartalom változásnak felelnek meg, a relatív dielektromos állandóból ki kellett számítanom a minta becsült nedvességtartalmát (a továbbiakban számított nedvességtartalom). A méréseimhez használt nedvesség kalibrációt David Funk fejlesztette ki. A nedvességtartalom kalibrációs egyenleteit úgy határozta meg, hogy modellezzék a különböző nedvességmérők működését a különböző mérőfrekvenciákon. A mért párhuzamos kapacitás és vezetőképesség értékeket (236 kukorica minta, 2 ismétlés, 10 különböző frekvencia) a (24) és (26) egyenletek alkalmazásával relatív dielektromos állandóvá alakította. Majd alkalmazta az LLL sűrűségkorrekciót és a relatív dielektromos állandót konvertálta egy  $0,686 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$  célsűrűségre. A szárítószekrényes nedvességtartalom értékeit ábrázolta a sűrűségkorrigált relatív dielektromos állandó függvényében 10 különböző frekvencián. Az így kapott görbékre másodfokú polinomokat illesztett.

A sűrűségkorrigált relatív dielektromos állandó ( $\epsilon'_r$ ) és a nedvességtartalom (M) kalibrációs összefüggése a (34) másodfokú egyenlet, melynek paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

$$M = K0 + K1 \cdot \epsilon'_r + K2 \cdot (\epsilon'_r)^2 - Ktc \cdot (T_{minta} - 25) \quad (34)$$

ahol  $K0$ ,  $K1$  és  $K2$  a számított paraméterek,  $Ktc$  a hőmérséklet korrekciós paraméter (0.10 % nedvesség Celsius fokonként) és  $T_{minta}$  a mért minta hőmérséklete.

1. táblázat A kukorica kalibrációs egyenletének együtthatói 10 megadott frekvencián

Frekvencia (MHz)	K0 (offset)	K1 (lineáris)	K2 (másodfokú)
0,1	8,33	1,045	-0,01024
0,2	6,3	1,498	-0,01948
0,3	4,76	1,857	-0,02836
0,5	2,47	2,412	-0,04437
1	-1,05	3,316	-0,07457
2	-4,7	4,305	-0,1106
3	-6,67	4,863	-0,13048
5	-8,7	5,453	-0,14764
12	-9,98	5,738	-0,12261
18,5	-10,08	5,785	-0,10727

A közbenső frekvenciákon interpolációval határozható meg  $K0$ ,  $K1$  és  $K2$  értékei.



## 4.5 A MÉRÉSI ÖSSZEÁLLÍTÁSOK ÉS A MÉRÉSEK MENETE

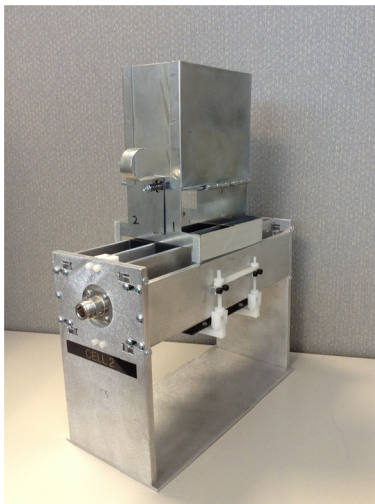
Az impedancia mérések előtt megmértem a minták hőmérsékletét és a mérések után a tesztcellában lévő minta tömegét a szükséges hőmérséklet és sűrűségkorrekció alkalmazásához.

### 4.5.1 A betöltési módok vizsgálata

A mérések célja a kukorica minták halmaztömörödöttségének megváltoztatása volt, amit két különböző betöltési móddal, a lassú és gyors betöltésekkel és a tesztcellában lévő gabona felső rétegén alkalmazott különböző nagyságú nyomással értem el.

A különböző betöltések minden tesztcellánál azonos módon történtek. A „lassú” betöltés módszere a következő: A gabonamintákat először lassan, mintegy 30 másodperc alatt töltöttem be tesztcellába, annak folyamatos rázása mellett. A tesztcellát minden esetben túltöltöttem, és a tetején található felesleges gabonát az USDA által előírt módon, szigetelő anyagból készült vonalzóval, a tesztcella tetejére merőlegesen tartva és tökéletesen illeszkedve, „cikk-cakk” mozgással, lehúztam. Így biztosítva, hogy a tesztcellában mindig állandó térfogatú minta kerüljön. Ezután elvégeztem a dielektromos méréseket.

„Gyors” betöltéskor a minta betöltéséhez egy a 18. ábrán látható UGMA tesztcellánál alkalmazotthoz hasonló, a tesztcellák fölé helyezhető betöltő szerkezetet alkalmaztam.



18. ábra Az UGMA tesztcella a gyorsbetöltő szerkezettel

A gabonahalmaz a betöltő szerkezet gombnyomással (UGMA tesztcellánál kar kihúzásával) nyitható ajtaján helyezkedett el, és annak nyitásakor a minta pillanatszerűen másodperc alatt zúdult be tesztcellába, miközben a cella nyugalmi, rázkódásmentes állapotban volt. A tesztcellákat ebben az esetben is túltöltöttem, majd a felesleges gabonát a mintatartó tetejéről lehúztam. Elvégeztem a dielektromos méréseket, majd megmértem a tesztcellában lévő minta tömegét.

#### 4.5.2 A nyomás hatásának vizsgálata

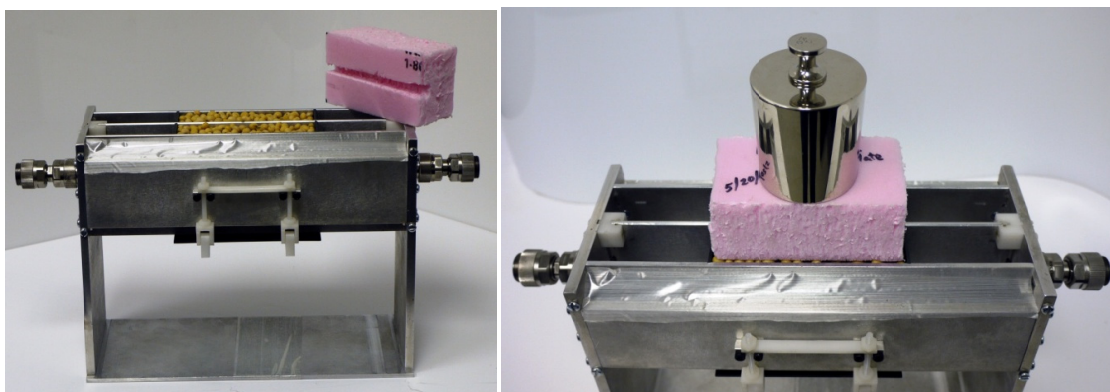
A nyomás által okozott halmaztömörödöttséget kétféle módon értem el. Az egyik esetben a GAC és a hengerkondenzátor, módosított hengerkondenzátor tesztcellákban lévő gabonahalmazt egy SMS TA-XT2 precíziós penetrométerrel, előre beállított erővel nyomtam meg (19. ábra).



19. ábra A terhelés hatásának vizsgálata SMS TA-XT2 precíziós penetrométerrel a hengerkondenzátor tesztcellával

A dielektromos méréseket a kívánt erő elérésekor mértem, állandó erő mellett, rögzítve az adott erőhöz tartozó maximális deformációt. A deformáció ismeretében számoltam ki a tesztcellában lévő gabonahalmaz sűrűségét. A nyomófej szigetelő anyagból készült, relatív dielektromos állandója értéke közel 1.0, így jelenléte nem módosította a mérés eredményét. A kísérletben szereplő kukorica mintákat további mérésre nem használtam.

A másik esetben az UGMA tesztcellával a gabona halmaz tetejére poliuretánból készült, megfelelően kialakított nyomófejet tettem, amire 5 másodpercre 1, 2 és 3 kg tömegű mérlegsúlyt helyeztem (20. ábra).



20. ábra Az UGMA tesztcella a poliuretán nyomófejjel

A dielektromos mérést közvetlenül a mérlegsúly eltávolítása után végeztem el. A kukoricával és szójjával végzett méréseket nedvességtartalmanként háromszor végeztem el. Mindkét módszernél a terheléses vizsgálatok előtt a mintát minden esetben gyors betöltéssel jutattam a tesztcellákba. A gabonát túltöltöttem, majd a felesleget lehúztam a tesztcella tetejéről.

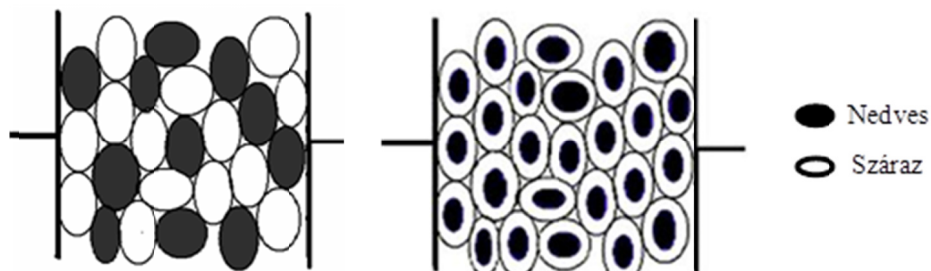
A kísérletek során meghatározott nagyságú terhelőerőket (0-100 N között) alkalmaztam, azonban az adott terhelőerő különböző nyomás értéket jelent az egyes tesztcelláknál a különböző nyomófelület miatt. A terhelőerők és nyomás értékké való konverzióját a 2. táblázatban tüntettem fel.

2. táblázat A terhelőerő és a nyomás konverziós táblázata

Dielektromos mérés nyomás alatt						Dielektromos mérés a nyomás megszűnte után	
Hengerkondenzátor		Módosított hengerkondenzátor		GAC tesztcella		UGMA tesztcella	
Erő (N)	Nyomás (kPa)	Erő (N)	Nyomás (kPa)	Erő (N)	Nyomás (kPa)	Erő (N)	Nyomás (kPa)
0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
5	-	5	-	5	1.4	5	-
10	1.5	10	1.9	10	2.8	10	1.8
15	-	15	-	15	4.2	15	-
20	3.0	20	3.9	20	5.6	20	3.5
25	-	25	-	25	7.0	25	-
50	7.6	50	9.7	50	-	50	-
75	11.4	75	14.6	75	-	75	-
100	15.2	100	19.4	100	-	100	-

#### 4.5.3 Inhomogén nedvességeloszlás

Egy tesztcellában lévő gabonaminta kétféle módon lehet inhomogén a benne lévő nedvesség eloszlása szempontjából. Az egyenlőtlen nedvességeloszlás jelentkezhet az egyes magokon belül, vagy a minta egészét tekintve, a száraz-nedves gabonaszemek keverékében a gabonaszemek között (21. ábra).



21. ábra Inhomogén nedvességeloszlás a magok között (bal oldal); és magon belül (jobb oldal) kapacitív mérőcellában

#### 4.5.3.1 A gabonaszemek belüli egyenlőtlen nedvességeloszlás vizsgálata

A kukorica mintákat Venticell 110 típusú laboratóriumi szárítószekrényben szárítottam 70 °C hőmérsékleten. A szárított minták szárítószekrényvel meghatározott kiindulás nedvességtartalmát és a végső nedvességét az 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat Szárítószekrényes nedvességtartalom értékek szárítás előtt és után

Nedvességtartalom szárítás előtt, %	Szárítási idő, h	Nedvességtartalom szárítás után, %
22,9	1	18,5
22,9	2	16,5
25,4	1	20,3
25,4	2,3	15,6
25,4	3	14,9
26,2*	2	14,6
26,2*	3	12,1
26,2*	4	11,2
26,2*	5	10,2
34,0	2	23,5
34,0	3	21,0

\* Burrows 700 nedvességmérővel

A kukorica mintákat egy 170 x 170 x 20 mm fémrács tartóba helyeztem, az egyenletes száradást biztosítva 2 szem (≈1cm) rétegvastagságban (22. ábra).



22. ábra Kukorica szárítása a szárító szekrényben fémhálóból készült tálcákon

A száradási idő letelte után kivettem a mintákat a szárítószekrényből, majd légmentesen zárható műanyag zacskókba tettem, és hagytam szobahőmérsékletre, 20-21°C-ra lehűlni. Minden mintát mindkét LRC mérővel megmértem háromszoros ismétléssel. A dielektromos mérések után a gabonákat egy légmentesen záródó edényben 24 órán keresztül pihentettem, majd megismételtem a

dielektromos méréseket. Szabványmódszerrel meghatároztam a minták nedvességtartalmát kiegyenlítőds előtt és után.

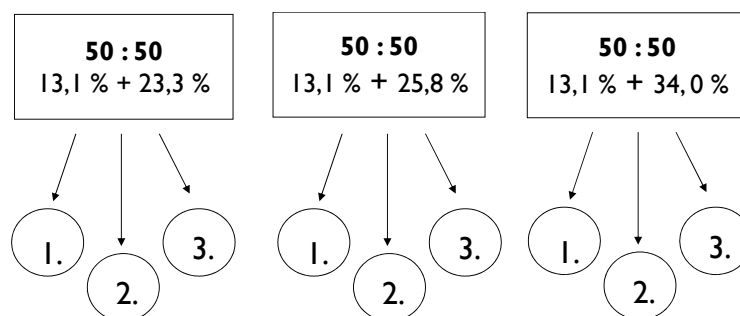
A doktori munkám során elvégzett kísérletekben alkalmazott tesztcellákat és a mérőműszereket, a felhasznált gabonák fajtát és a vizsgált nedvességtartalom tartományokat, az adott tartományon belül felhasznált minták számát (ami nem azonos az ismétlés számmal az egyes kísérletekben) a 4. táblázatban foglaltam össze.

4. táblázat Az anyagok és módszerek fejezet összefoglalása

Anyagok és módszerek fejezet témakör szerinti összesítése				Tesztcella típusok			
				Síkkondenzátor		Hengerkondenzátor	
				GAC	UGMA	eredeti	módosított
I. Betöltési módok és a nyomás hatásának vizsgálata	Alkalmazott tesztcella			+	+	+	+
	A mért gabona minta	kukorica	Nedvesség-tartalom	13,5-26,0 %	11,2-28,8 %	16,2-31,8 %	16,2-31,9 %
			Minta szám	8	8	6	8
		Szója	Nedvesség-tartalom		10,6-20,3 %		
			Minta szám		12		
II. Inhomogén nedvesség-eloszlás hatásának vizsgálata	Szemek között (keverékek)	Alkalmazott tesztcella			+		
		A mért gabona minta	Természetes kukorica	Nedvesség-tartalom	13,1-34,0 %		
				Minta szám	9		
			Vissza-nedvesített kukorica	Nedvesség-tartalom	18,0-30,0 %		
				Minta szám	16		
	Szemekben belül (szárítás)	Alkalmazott tesztcella			+		
		A mért gabona minta	Kukorica	Nedvesség-tartalom	22,9-34,0 %		
				Minta szám	11		
III. Dielektromos spektrum tulajdonságai 100 MHz alatt	Alkalmazott tesztcella				+		
	A mért gabona minta	Kukorica	Nedvesség-tartalom		11,2-35,2 %		
			Minta szám		8		
		Szója	Nedvesség-tartalom, %		8,8-22,9 %		
			Minta szám		12		

#### 4.5.3.2 Keverékek vizsgálata

A keverékek vizsgálatát 3 oldalról közelítettem meg. Elsőként, ugyanazon száraz kukorica mintából és 3 különböző nedvességtartalmú, nedves kukoricából készítettem 50:50 tömegarányú keverékeket, minden nedvességtartalmon 3 adagot (23. ábra):



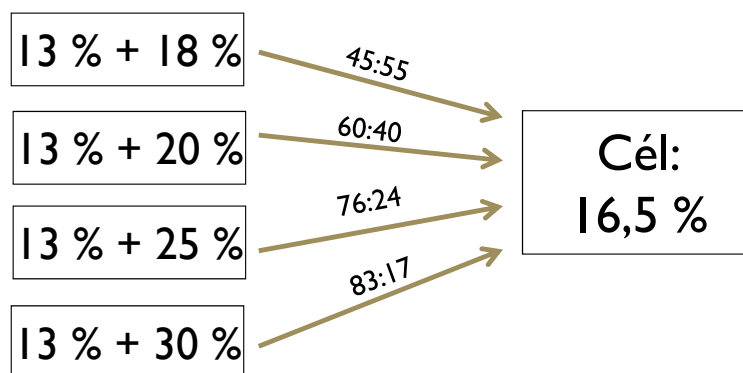
23. ábra Az 50:50 tömegarányú kukorica keverékek keverési sémája

Az így elkészített keverékek relatív dielektromos állandójából a (34) egyenlet alkalmazásával kiszámítottam a minták nedvességtartalmát. Az 50:50 tömegarányú keverék leírását az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat A száraz és a nedves kukorica minták 50:50 tömegarányú keverékek keverési táblázata a kiindulási és a keverék minták szárítószekrényes nedvességtartalmával

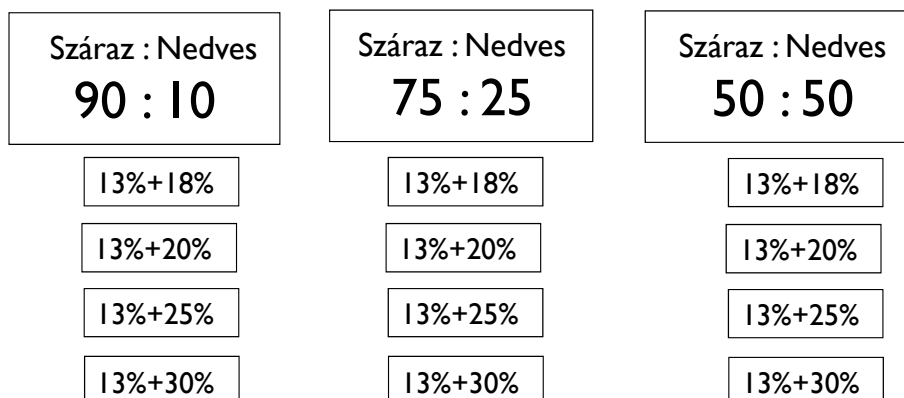
Száraz minta nedvességtartalma, %	Nedves minta nedvességtartalma %	50:50 arányú keverék minta nedvességtartalma, %
13,1	23,3	17,7
13,1	23,3	17,8
13,1	23,3	17,5
13,1	25,8	18,8
13,1	25,8	19,0
13,1	25,8	19,0
13,1	34,0	23,1
13,1	34,0	22,8
13,1	34,0	23,2

A második kísérletsorozatban a 13,1 % nedvességtartalmú mintából visszanedvesítéssel 18-30 % nedves mintákat készítettem. A keverési arányokat kétféleképpen állítottam be. Első lépésben a 16,5 % nedvességtartalmú keverékek létrehozatala volt a célom (24. ábra).



24. ábra Adott nedvességtartalomra beállított keverékek keverési sémája

Végezetül, különböző tömegarányok hatását vizsgáltam meg négy különböző nedvességtartalom (25. ábra).



25. ábra Különböző keverési arányú kukorica keverékek sémája

A beállított nedvességtartalom ellenőrzésére a visszanedvesített minták nedvességtartalmát DICKEY-john GAC-2100 gyors nedvességmérővel határoztam meg. A keverékek kiegyenlítődés előtti és utáni nedvességtartalom meghatározása szárítószekrényes módszerrel történt. Az visszanedvesített kukorica mintákból készült keverékek leírását a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat Visszanedvesített kukorica mintákból készült keverékek keverési táblázata

Száras minta nedvességtartalma, % (GAC-2100)	Nedves minta nedvességtartalma, % (GAC-2100)	Keverési arány (száras:nedves)	50:50 arányú keverék minta nedvességtartalma, % (Szárítószekrényel)
13	18	45:55	16,4
13	20	60:40	16,3
13	25	76:24	16,4
13	30	83:17	16,6
13	18	90:10	14,4
13	20	90:10	14,5
13	25	90:10	14,8
13	30	90:10	15,1
13	18	75:25	15,0
13	20	75:25	15,4
13	25	75:25	16,6
13	30	75:25	17,9
13	15	50:50	16,2
13	20	50:50	16,9
13	25	50:50	19,8
13	30	50:50	22,8

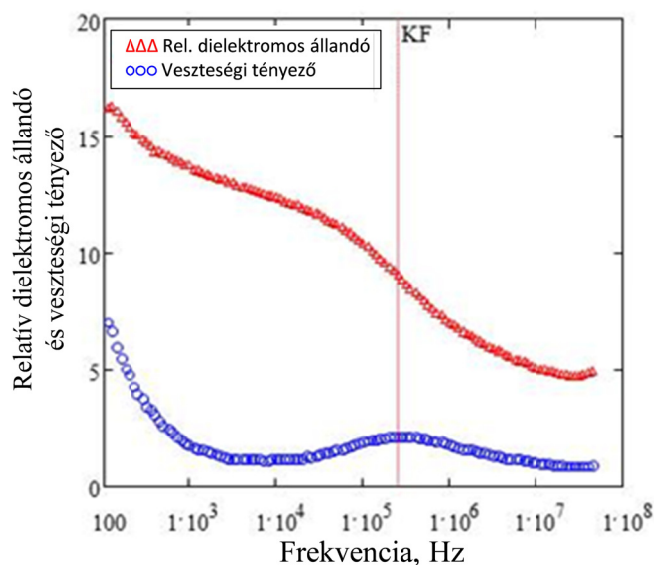
Mindkét kísérletsorozathoz GAC tesztcellát használtam. A tesztcellát gyors betöltéssel túltöltöttem, majd a gabonafelesleget lehúzással eltávolítottam. A dielektromos mérések menete is azonos volt: közvetlenül az összekeverés után felvettem a minták dielektromos spektrumát mindkét

LRC mérővel. Minden minta adagot ötszörös ismétléssel mértem, minden ismételtnél új betöltéssel. Az esetleges nedvességvesztést elkerülendő, a mérések között a mintákat zárható műanyag zacskóban tartottam. A dielektromos mérések után a mintákat légmentesen záródó műanyag tartókba helyeztem, és 24 órán keresztül pihentettem 20°C-on. Pihentetés közben a kukoricákat többször átmozgattam a mintatartó kinyitása nélkül. Végezetül ötszörös ismétléssel megmértem a már kiegyenlítődtött keverékek dielektromos jellemzőit.

## 4.6 AZ ARGAND GÖRBE PARAMÉTEREI

A következő alfejezetben a mérési eredmények értékeléséhez használt Argand ábrák jellemzőit mutatom be.

A 26. ábrán egy 15,5 % nedvességtartalmú szója relatív dielektromos állandóját és veszteségi tényezőjét ábrázoltam a frekvencia függvényében.

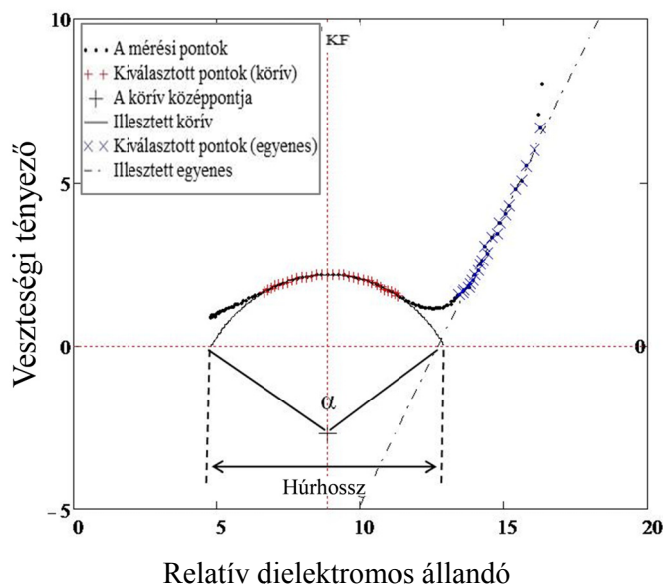


26. ábra relatív dielektromos állandó és veszteségi tényező a frekvencia függvényében 15,5 % nedvességtartalmú szója minta esetén. Karakterisztikus frekvencia: KF = 255 kHz-en.

A relatív dielektromos állandó és a veszteségi tényező 1 kHz alatt hirtelen megemelkedik, értéke megnő. A veszteségi tényező lokális maximuma 255 kHz-nél található. Ebben a pontban a legnagyobb a relatív dielektromos állandó görbének a meredeksége a Maxwell-Wagner relaxáció tartományában.

Az előbbi adatokat Argand ábrán (a veszteségi tényező a relatív dielektromos állandó függvényében) megjelenítve, meghatározható a görbe egy olyan szakasza, amire egy félkörívet és kis frekvenciákon egy egyenest lehet illeszteni (27. ábra)





27. ábra Egy 15,5 % nedvességgű szója dielektromos jellemzői Argand ábrán megjelenítve, a mért adatpontokra illesztett körívvel, az illesztett egyenessel és a leíró paraméterekkel (KF: karakterisztikus frekvencia,  $\alpha$ : a körív központi szöge, húrhossz: a relatív dielektromos állandó különbsége, amely a Maxwell-Wagner relaxáció miatt jött létre).

A mért pontokra illesztett körív a Maxwell-Wagner relaxációt, az illesztett egyenes az elektródpolarizációt mutatja meg a minta dielektromos görbéjén. A görbék illesztéséhez egy félautomata Mathcad programot használtam. A program működéséhez elsőként meg kellett határozni azt a frekvenciatartományt, amelyben a körívet és az egyenes illesztését végeztem. Az általam mért minták görbéin a legtöbb, de nem minden esetben a két illesztéssel a relaxációs hatásoknak (Maxwell-Wagner, elektród polarizáció) megfelelő frekvenciatartományok jól elhatárolódtak egymástól. A gabonaminták dielektromos viselkedésének leírásához az Argand ábrából az alábbi paramétereket határoztam meg:

Húrhossz: Az illesztett körív és az x-tengely (relatív relatív dielektromos állandó) által meghatározott húr nagysága. E paraméter közvetlenül kapcsolatban áll a Maxwell-Wagner relaxációval. Nagysága a relaxáció erősségét adja meg, azaz hogy mekkora változást okoz a Maxwell-Wagner relaxáció a minta relatív dielektromos állandójának értékében a vizsgált frekvenciatartományban.

Karakterisztikus frekvencia (KF): A veszteségi tényező lokális maximumához tartozó frekvencia. A Maxwell-Wagner relaxáció rezonancia frekvenciája.

A körív központi szöge ( $\alpha$ ): A karakterisztikus frekvenciák eloszlását jellemzi a dielektromos görbén. Ha  $\alpha = 180^\circ$ , akkor csak egy karakterisztikus frekvencia van jelen, és az

illesztett kör középpontja az x-tengelyen helyezkedik el. Ha  $\alpha < 180^\circ$ , akkor ez egy szélesebb karakterisztikus frekvencia eloszlást jelez.

A veszteségi csúcs: Ez a paraméter adja meg a veszteségi tényező maximumát a Maxwell-Wagner relaxáció tartományában. Közvetlen kapcsolatban áll  $\alpha$ -val, hiszen a karakterisztikus frekvenciák szélesebb eloszlása csökkenti a veszteségi tényező maximum értékét.

Az a hipotézisem, hogy a meghatározható paraméterek közül a húr hossz a legalkalmasabb a Maxwell-Wagner relaxáció jellemzésére a gabonaminták dielektromos görbéjében.

#### 4.7 DIELEKTROMOS POLARIZÁCIÓ FELSŐ HATÁRÁNAK BECSLÉSE

Dolgozatomban a gabonák spektrumaiban megfigyelhető két fő vezetési hatás az elektród polarizáció és a Maxwell-Wagner relaxáció dielektromos spektrumra gyakorolt hatását vizsgáltam meg a különböző zavaró tényezők függvényében. Felmerült a kérdés, hogy megbecsülhető-e egy olyan elméleti felső határ, amelynél nagyobb relatív dielektromos állandóról biztonsággal kijelenthető, hogy nem a vízmolekulák orientációjából származik. Nelson és Stetson (1976) mutatott rá arra, hogy a gabonák kis frekvenciákon mért relatív dielektromos állandó értéke túl nagy ahhoz, hogy azt a bipoláris vízmolekulák reorientációja okozza. Véleményük szerint a jelenség feltételezhetően a vezetési hatások miatt jön létre. Funk (2001) a Landau-Lifshitz, Looyenga keverékekre vonatkozó egyenletének (13) használatával az alábbi módon megbecsülte azt a legnagyobb értéket, amennyivel a vízmolekulák orientációja járul hozzá a gabonaminta mért relatív dielektromos állandójához:

$$\varepsilon_{keverék}^{\frac{1}{3}} = v_1 \cdot \varepsilon_1^{\frac{1}{3}} + v_2 \cdot \varepsilon_2^{\frac{1}{3}} \rightarrow \varepsilon_{keverék} = \left( v_1 \cdot \varepsilon_1^{\frac{1}{3}} + v_2 \cdot \varepsilon_2^{\frac{1}{3}} \right)^3 \quad (35)$$

ahol  $\varepsilon_{keverék}$  keverék relatív dielektromos állandója,  $v_1$  és  $v_2$  a keveréket alkotó komponensek relatív térkitöltése,  $\varepsilon_1$  és  $\varepsilon_2$  a komponensek relatív dielektromos állandója. Alkalmazva a (13) egyenletet egy nedves gabonaszemre, ami felfogható egy száraz, nem porózus, szerves anyag és a víz keverékeként:

$$\varepsilon_{nedves\ mag} = \left( \varepsilon_{víz}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{M \cdot \rho_{száraz\ mag}}{M \cdot (\rho_{száraz\ mag} - 1) + 1} + \varepsilon_{száraz\ mag}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{(1-M)}{M \cdot (\rho_{száraz\ mag} - 1) + 1} \right)^3 \quad (36)$$

ahol  $\varepsilon_{nedves\ mag}$  és  $\varepsilon_{száraz\ mag}$  a nedves és a száraz gabonaszem relatív dielektromos állandója,  $\varepsilon_{víz}$  a víz relatív dielektromos állandója,  $\rho_{száraz\ mag}$  a "csontszáraz" gabonaszem sűrűsége,  $M$  a nedves gabonaszem nedvességtartalma. A nedves mag relatív dielektromos állandója becsülhető az irodalmi adatokból. A víz sűrűsége 1 g/ml és relatív dielektromos állandója 25 °C-on 78,5. A száraz

gabonaszemek sűrűsége általában 1,0-1,5 g/ml és az úgynevezett csontszáraz gabona relatív dielektromos állandója 2-3.

Az előbbi összefüggést felírva egy nedves gabonaszemekből és a levegő keverékéből álló gabonamintára (37) (felhasználva, hogy a levegő relatív dielektromos állandója 1 és sűrűsége a keverékben megközelítően 0):

$$\varepsilon_{gabona\ mint} = \left[ v_{\ddot{o}nm} \cdot \left( \varepsilon_{v\ddot{z}}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{M \rho_{sz\ddot{a}raz\ mag}}{M \cdot (\rho_{sz\ddot{a}raz\ mag} - 1) + 1} + \varepsilon_{sz\ddot{a}raz\ mag}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{(1-M)}{M \cdot (\rho_{sz\ddot{a}raz\ mag} - 1) + 1} - 1 \right) + 1 \right]^3 \quad (37)$$

ahol  $\varepsilon_{gabonaminta}$  a teljes gabonaminta (nedves gabonaszemek és a levegő) relatív dielektromos állandója,  $v_{\ddot{o}nm}$  a mintában az nedves gabonaszemek összterfoglata. Az így kapott összefüggéssel számolt értéknél nagyobb (mért) relatív dielektromos állandó nem magyarázható csak a poláris vízmolekulák forgásával.



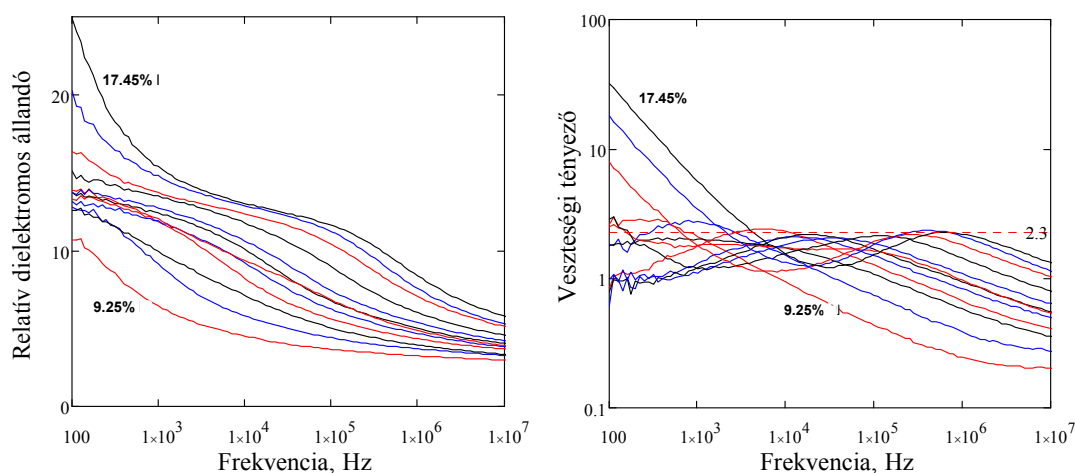
## 5 EREDMÉNYEK

Az eredmények első része a gabona dielektromos spektrumának tulajdonságait, és azok leírását tartalmazza. A második részben a tesztcellában lévő gabona halmaztömörödöttségét befolyásoló tényezőket, különösképpen a nyomás hatását vizsgálom meg, több oldalról. Végezetül az inhomogén nedvességeloszlással kapcsolatos eredményeket mutatom be.

### 5.1 A DIELEKTROMOS SPEKTRUM TULAJDONSÁGAI 100 MHZ ALATT

#### 5.1.1 A szója dielektromos spektruma

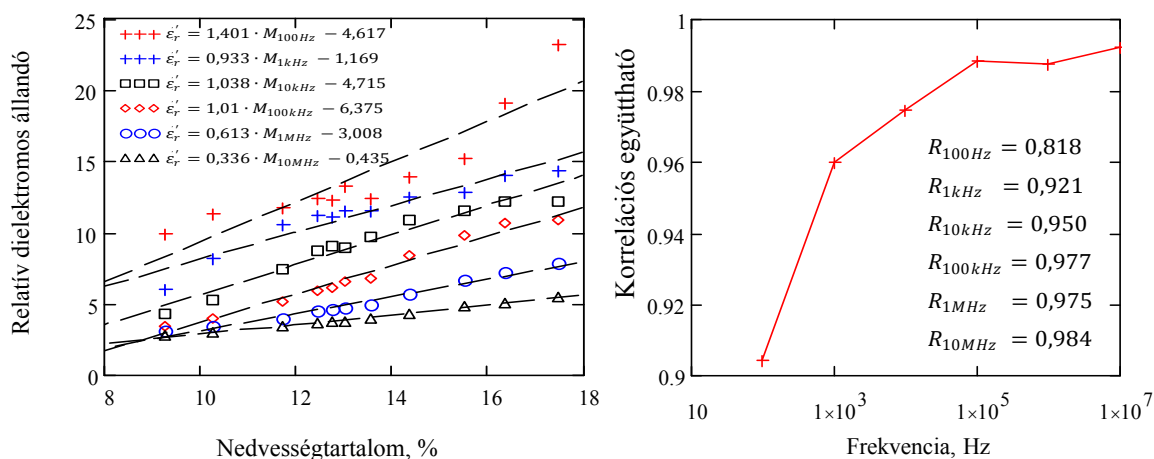
A dielektromos spektrumok jellemzéséhez 12 különböző, 9,25 - 17,45 % nedvességtartalmú szója minta dielektromos jellemzőit mértem meg 100 Hz-től 10 MHz-ig terjedő frekvenciatartományban az UGMA tesztcellával. Az eredmények a 28. ábrán láthatók.



28. ábra A relatív dielektromos állandó és a veszteségi tényező frekvencia függése 9,25 - 17,45 % közötti nedvességtartalmú szója minta esetén.

Mindkét dielektromos jellemzőről megállapítható, hogy a görbéken látható “hullám” a kis frekvenciákról eltolódik a nagyobb frekvencia értékek felé, ahogy a minta nedvességtartalma növekszik. A relatív dielektromos állandó értéke adott nedvességtartalmon monoton csökken a frekvencia növekedésével, azonban a minta nedvességtartalmának növekedésével monoton nő. A veszteségi tényező lokális minimumának és maximumának helye mintáról-mintára változik a frekvencia függvényében, de lokális minimumának és maximumának értéke minden mintánál közel ugyanakkora. A dielektromos görbék elemzése szempontjából a helyi maximum értéknek van jelentősége, amely a Maxwell-Wagner relaxációt jelző veszteségi csúcs. A veszteségi görbéken a lokális maximumok nagysága a nedvességtartalomtól függetlenül  $\approx 2,3$ .

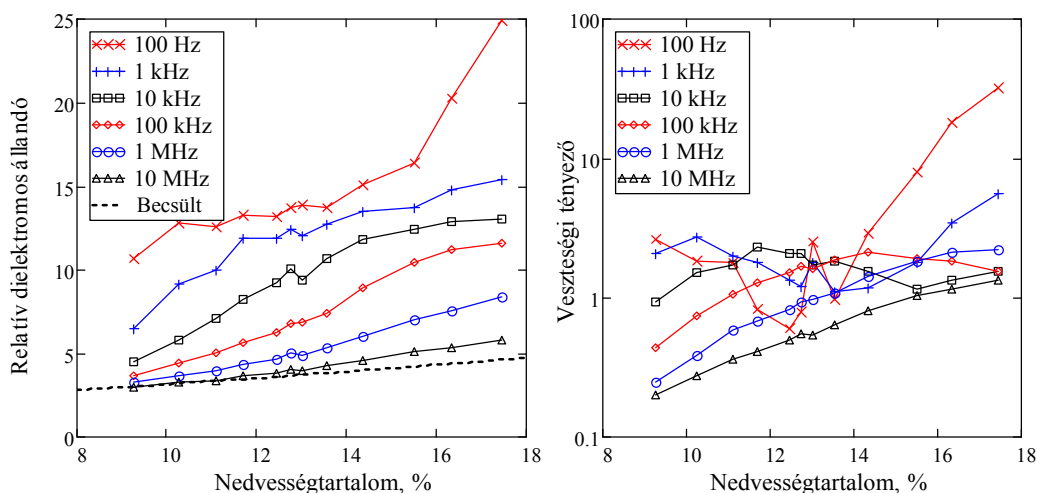
A 29. ábrán az előbbi 12 szója minta relatív dielektromos állandóját ábrázoltam a minták szárítószekrénnel meghatározott nedvességtartalmának függvényében 6 különböző frekvencián, és az adott frekvenciához tartozó mérési pontokra egyenest illesztettem.



29. ábra A 9,25 - 17,45 % közötti nedvességgű szójakra illesztett egyenesek és a korrelációs együtthatók a frekvencia függvényében.

Az ábrán jól látható, hogy az  $R$  értéke a frekvencia növekedésével nő. A nagyobb frekvenciák felé haladva a relatív dielektromos állandó nedvességgfüggése egyre lineárisabb, ahogy ez az irodalomból jól ismert.

A 30. ábrán szaggatott vonallal ábrázoltam az adott frekvenciához tartozó, a (37) egyenlettel becsült relatív dielektromos állandót (mely feltételezhetően a víz polarizációjából származik) ábrázoltam. A számításhoz felhasználtam az alábbiakat:  $\epsilon_{\text{víz}}=78,5$ ,  $v_{\text{önm}}=0,7$ ,  $\rho_{\text{száraz mag}} = 1,4 \text{ g/ml}$  és  $\epsilon_{\text{száraz mag}}=2$ .

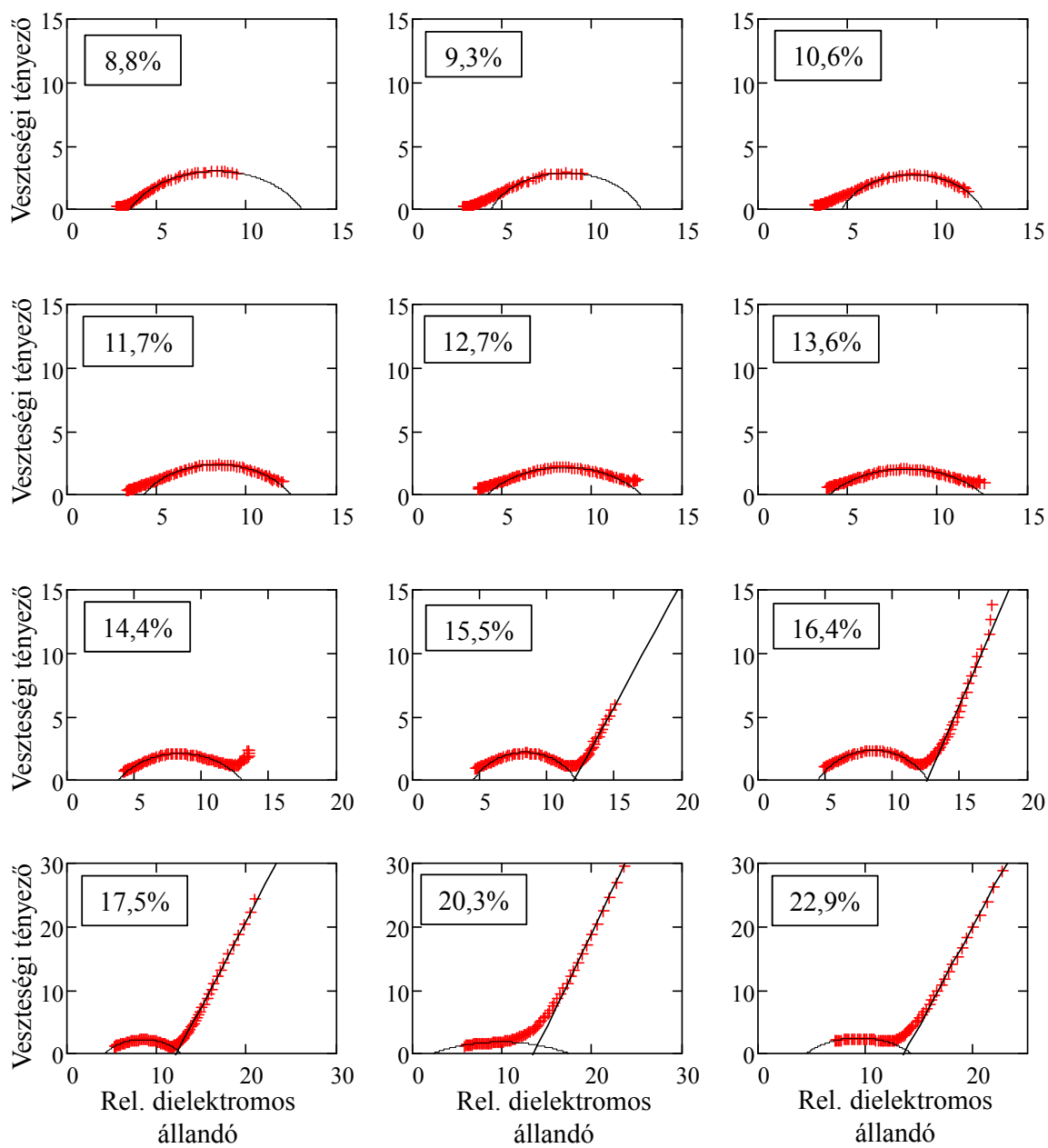


30. ábra A relatív dielektromos állandó és a veszteségi tényező függése minta nedvességtartalmától különböző frekvenciákon és a feltételezhetően a vízmolekulák polarizációjából származó becsült felső határral (szaggatott vonal).

A becsült értéknél nagyobb relatív dielektromos állandó a vezetési hatások (elektrod polarizáció, Maxwell-Wagner relaxáció) eredményeképpen jön létre. Ezek a hatások a kisebb frekvenciákon nagyobb mértékben járulnak hozzá a relatív dielektromos állandó értékének növekedéséhez.

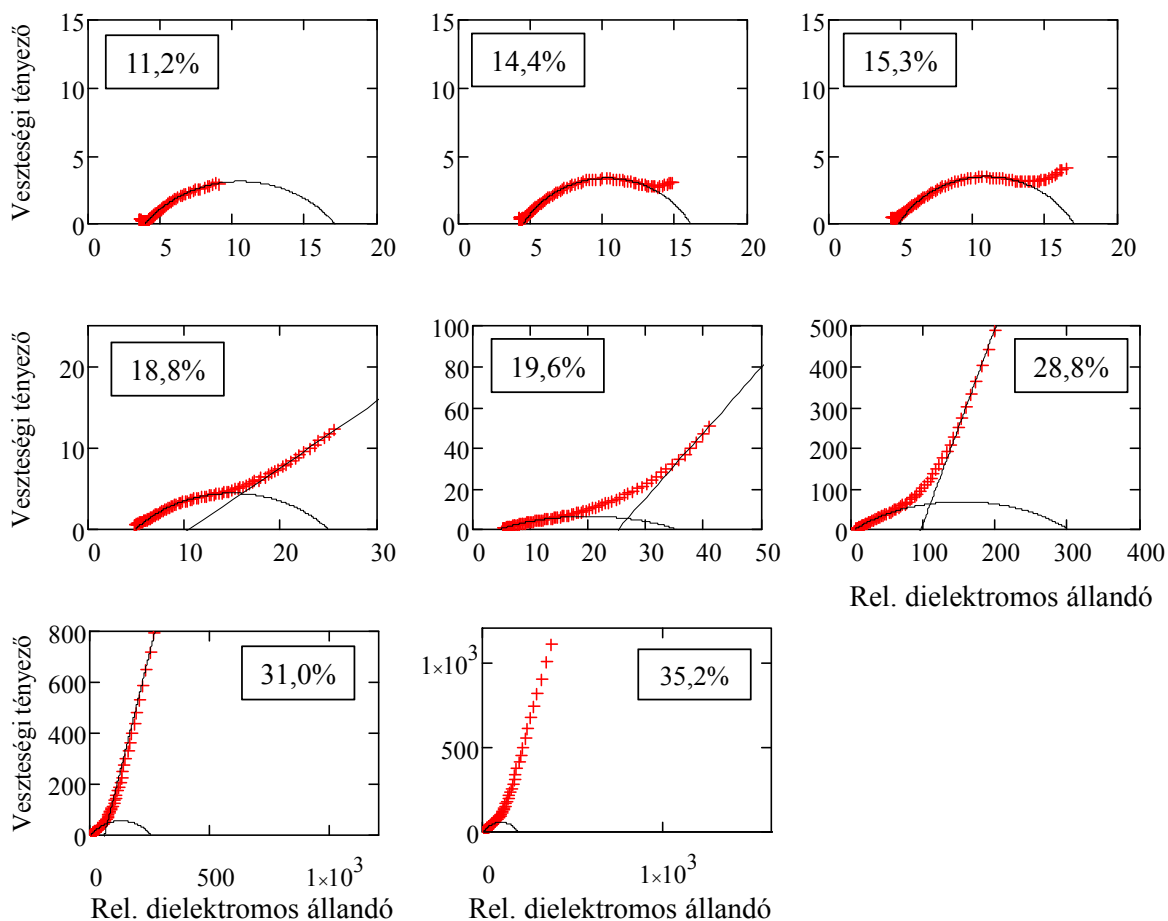
### 5.1.2 Argand ábrázolás

A gabonák dielektromos spektrumai nedvességtartalom függőek, így várhatóan az Argand görbéik is az adott nedvességre jellemzőek lesznek. Feltételezésem bizonyítására 12 szója és 8 kukorica mintát ábrázoltam Argand diagramon. Az így kapott görbékre körívet és ha lehetett egyenest illesztettem, és meghatároztam az illesztett paramétereket. A következő ábrákon a szója (31. ábra) és a kukorica (32. ábra) minták Argand ábrái láthatók az illesztett körívvel és egyenessel.



31. ábra A szója minták Argand görbéi





32. ábra A kukorica minták Argand görbéi

A szója és a kukorica minták Argand ábrájuk képe szerint 3 fő csoportra oszthatók. Az első csoportban, jellemzően a száraz gabonáknál, a Maxwell-Wagner relaxációra jellemző körív jelenik meg. Majd a nedvességtartalom növekedésével a görbe jobb oldalán egyre jobban kirajzolódik az elektród polarizációt jelző egyenes. A harmadik csoportba a nedves minták tartoznak, amelyeknél a Maxwell-Wagner körív egyre kisebb lesz, a kukoricáknál szinte el is tűnik, míg az egyenes egyre határozottabbá válik, az elektród polarizáció dominálja a görbéket, mint például a 28,8%-nál nedvesebb kukoricáknál. A nedves kukoricák Argand görbéin a Maxwell-Wagner körív fizikailag értelmezhetetlenné vált, hiszen ekkor a húr hossz, amely a relatív dielektromos állandó csökkenéssel egyenlő a relaxációt jellemző frekvenciatartományban száz-as nagyságrendű lett.

Az Argand ábrákban a kis frekvenciákon megjelenő lineáris szakasz az elektród polarizáció jelenlétét jelzi, amely egyre hosszabb és határozottabb lett a minta nedvességtartalmának növekedésével. A görbe ezen része nem modellezhető körívvel, azaz ideális ellenállásokkal és kapacitásokkal. Az elektród polarizáció a dielektromos görbéken az állandó fázisú elem megjelenéséről ismerhető fel. A relatív dielektromos állandó és a veszteségi tényező aránya

jellemzően állandó abban a frekvenciatartományban ahol az elektród polarizáció domináns a dielektromos spektrumban.

A szója és kukorica minták Argand görbéit összehasonlítva megállapítható, hogy míg a szója mintákon fokozatosan válik a dominánssá az elektród polarizáció, addig a kukorica minták görbéin ez a dominancia hirtelen jelenik meg a nedvességtartalom növekedésével. E jelenség oka a kukorica és szója szemek különböző alakjában és összetételében keresendő.

## **5.2 AZ LLL SŰRŰSÉGKORREKCIÓ MŰKÖDÉSE 100 MHZ ALATT**

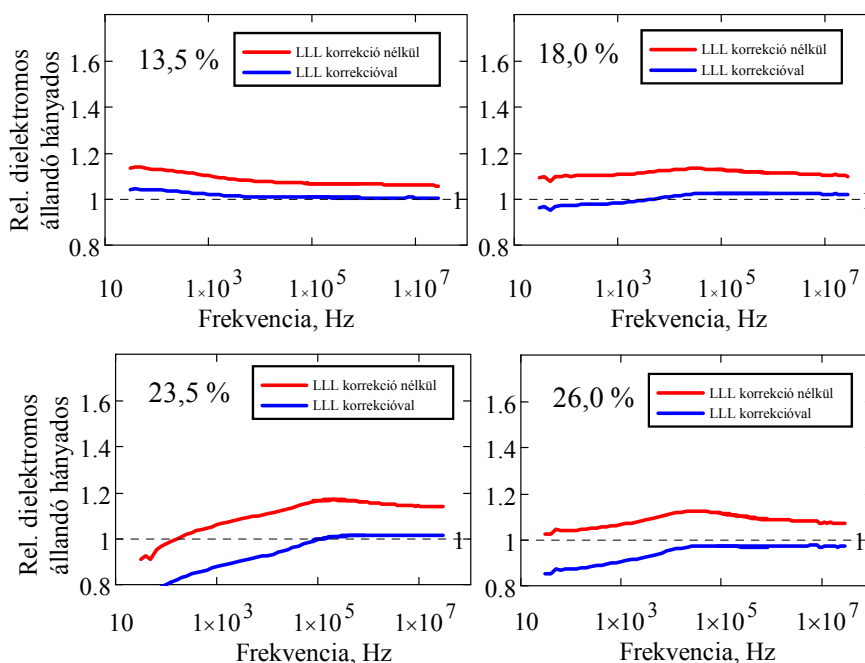
Ebben a fejezetben az LLL sűrűségkorrekció hatékonyságát vizsgáltam meg két eltérő, a gabonaminta tömörödöttségét okozó hatásnál, úgymint a rázás és a terményszlop tetején alkalmazott nyomás. A vizsgálatokba két hengerkondenzátor tesztcellát és két párhuzamos falú tesztcellát (GAC és UGMA) vontam be, melyek a kereskedelmi forgalomban nemzetközileg elterjedt dielektromos nedvességmérőkben is megtalálhatók. Az általam vizsgált frekvenciatartomány, magába foglalja a nedvességmérésben kiemelten fontos 1-20 MHz-es tartományt. Az LLL sűrűségkorrekció működését legkönnyebben ugyanazon minta két különböző tömörödöttségét előidéző hatás összehasonlításával tehetjük meg. Mivel a relatív dielektromos állandók közötti különbségek viszonylagosan nagyok voltak, a relatív dielektromos állandó hányados értékét vettem az összehasonlítások alapjául. A különböző betöltési módok vizsgálatánál a relatív dielektromos állandó hányadosot a nagyobb tömörödöttséget okozó lassú betöltés és ugyanazon minta gyors betöltéssel mért relatív dielektromos állandójának a hányadosából képeztem. A nyomás hatásának vizsgálatakor a relatív dielektromos állandó hányados az adott nyomáson mért és ugyanazon minta gyors betöltéssel mért relatív dielektromos állandójának a hányadosa. Az eredmények értékelése mindkét esetben ugyanaz. Ha az LLL sűrűségkorrekció jól működött az adott frekvencián, akkor a hányados 1, ami a különböző halmaztömörödöttségekből eredő hibák teljes kiküszöbölését jelenti. A betöltések és a nyomás vizsgálatánál egyaránt a nagyobb halmaztömörödöttséget okozó esetet osztottuk a kisebbel. Így ha hányados értéke nagyobb, mint 1, akkor ez a gyakorlatban annyit jelent, hogy a számított nedvességtartalom értéke nagyobb lesz, mint a tényleges nedvességtartalma a mintának. Ha a hányados értéke kisebb mint egy, akkor a minta nedvességtartalmát alábecsüljük a valóshoz képest. Az általam használt nedvesség kalibrációkkal a relatív dielektromos állandó értékében  $\pm\Delta\epsilon = 0,1$  eltérés kukorica esetén körülbelül  $\pm\Delta M = 0,35\%$  eltérést okoz a számított nedvességtartalom értékében, míg ugyanez az érték szója esetén  $\pm\Delta M = 0,21\%$  eltérést okoz.

Az eredményeket az egyes tesztcellákra lebontva közlöm. Az alkalmazott terhelőerő minden tesztcellánál 10 N és 20 N volt, ami azonban a nyomott felület nagyságának változása miatt különböző nyomásokat jelent.

## 5.2.1 GAC tesztcella

### 5.2.1.1 Az LLL sűrűségkorrekció és a betöltések vizsgálata

A 33. ábra a GAC tesztcellával mért 13,5 %-31,8 % nedvességtartalom közötti kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosát mutatja meg a frekvencia függvényében.



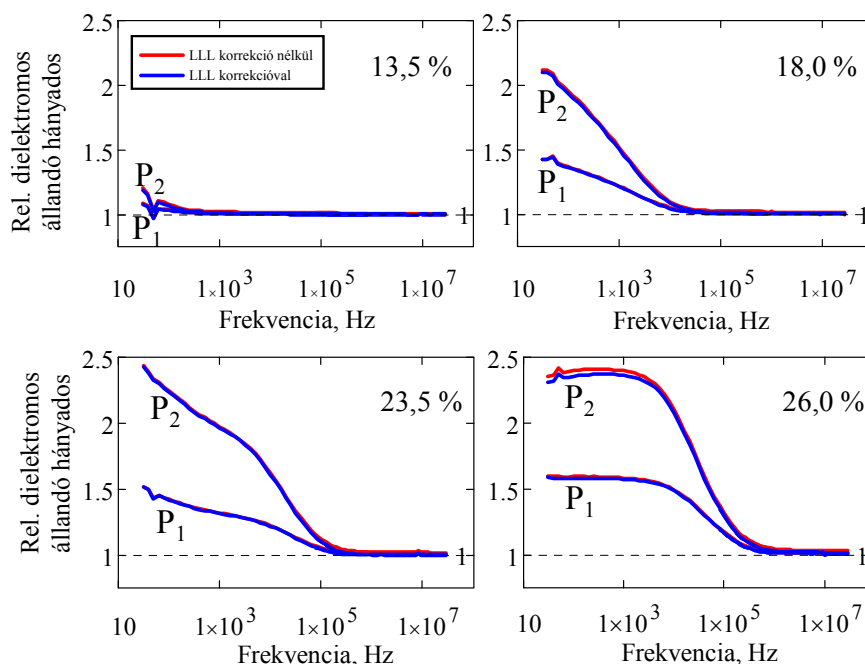
33. ábra A 13,5 %-26,0 % nedvességtartalmú kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosai ( $\epsilon'_{\text{lassú}}/\epsilon'_{\text{gyors}}$ ) a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, a GAC tesztcellával mérve

Az LLL sűrűségkorrekció alkalmazása után a hányados értéke  $\pm 0,03$  eltéréssel közelíti meg az 1-et 100 kHz felett minden mintánál. A 100 kHz alatti frekvenciákon a 18,0 %-nál nagyobb nedvességtartalmú minták relatív dielektromos hányados értéke a korrekció után egyre kisebb lett. Azonban az ideális esethez képest, amikor a hányados értékére 1-et kapunk eredményül, a maximális eltérés -0,2. Megállapíthatjuk, hogy az LLL sűrűségkorrekció hatékony volt.

### 5.2.1.2 Az LLL sűrűségkorrekció és a nyomás vizsgálata

Megvizsgáltam az LLL sűrűségkorrekció alkalmazhatóságát, a tesztcellában lévő gabonahalmaz tetején nyomást alkalmazva. A terhelést folyamatosan növeltem a kívánt nyomás

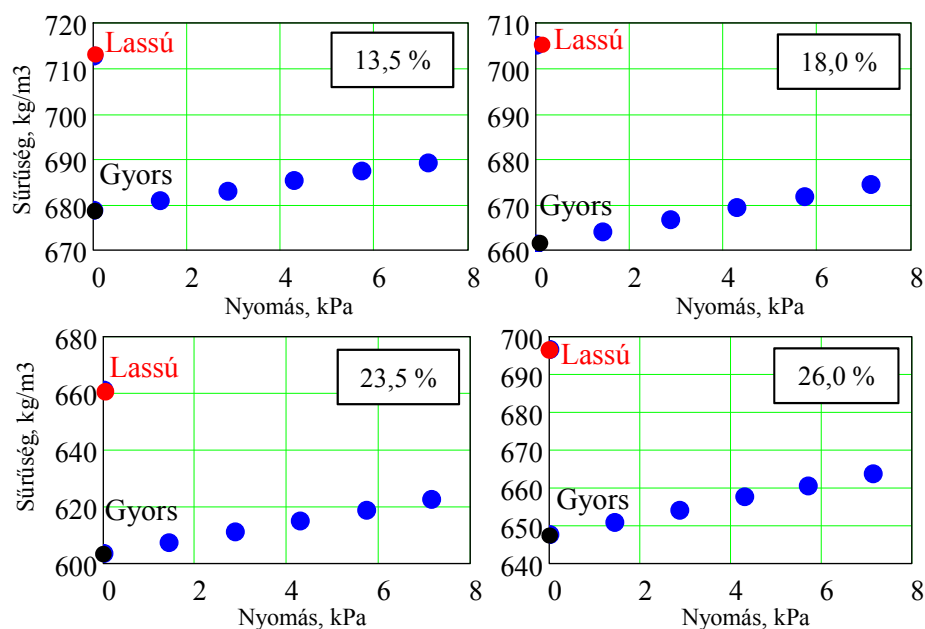
értékek eléréséig. A dielektromos méréseket nyomás alatt végeztem el. A 34. ábra a relatív dielektromos állandó hányadosát mutatja  $P_1 = 2,8 \text{ kPa}$  és  $P_2 = 5,6 \text{ kPa}$  nyomáson az LLL sűrűségkorrekció alkalmazása előtt és után a frekvencia függvényében.



34. ábra A 13,5 %-26,0 % nedvességtartalmú kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosai,  $\epsilon'_{(P1)}/\epsilon'_{gyors}$  és  $\epsilon'_{(P2)}/\epsilon'_{gyors}$ , a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, a GAC tesztcellával mérve;  $P_1 = 2,8 \text{ kPa}$  és  $P_2 = 5,6 \text{ kPa}$

Az LLL sűrűségkorrekció alkalmazása nem okoz jelentős változást a hányadosok értékeiben. A 13,5%-nál nedvesebb minták relatív dielektromos állandó hányados értéke nő a frekvencia csökkenésével és a nyomás nagyságának növekedésével 100 kHz alatt, azonban az LLL sűrűségkorrekció alkalmazása előtt és után a dielektromos görbe gyakorlatilag változatlan.

Mekkora sűrűségkülönbség jön létre a különböző betöltési módok és a terhelés hatására? A 35. ábrán a rázva és gyors betöltési módokkal, és a terhelés következtében létrejött minta sűrűségek láthatók.



35. ábra A 13,5 % és 26,0 % közötti nedvességtartalmú minták sűrűsége a nyomás függvényében a különböző betöltési módok és nyomások hatására a GAC tesztcellában. Piros pont jelöli a lassú betöltésű, fekete pont a gyors betöltésű minta sűrűségét. Kékkel jelöltem a különböző nyomásokhoz tartozó sűrűség értékeket.

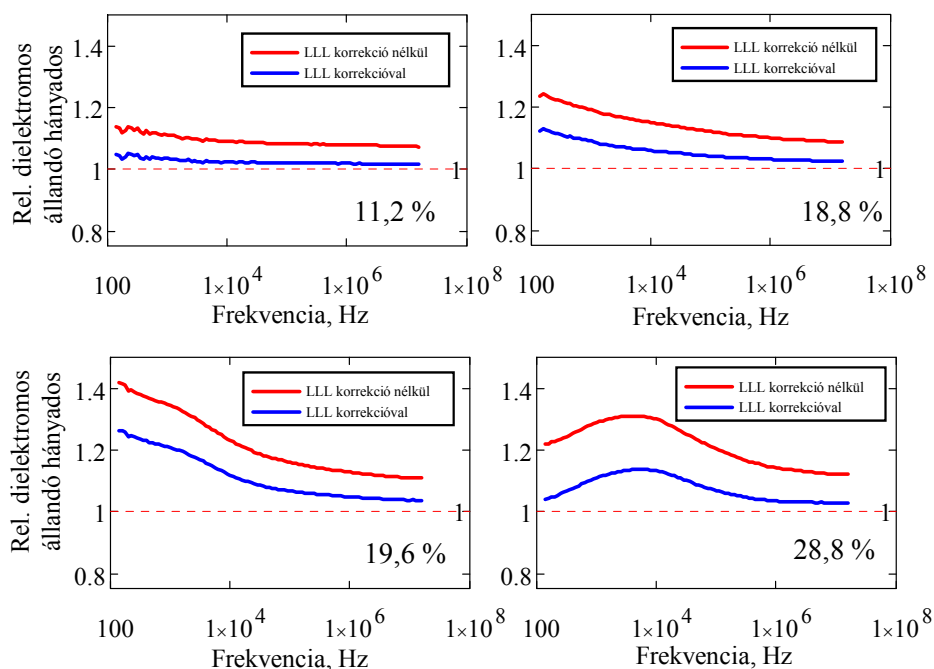
A lassú és gyors betöltési mód közötti sűrűség különbsége közel háromszorosa a gyors betöltés és a legnagyobb nyomás hatására létrejött sűrűségek különbségének, függetlenül a minta nedvességtartalmától.

Összehasonlítva a 33. és a 34. ábrán található különböző betöltések és a nyomások alkalmazása után kapott relatív dielektromos hányados görbéket ugyanazon nedvességtartalmú mintán megállapíthatjuk, hogy bár a nyomás a tesztcellában lévő gabona halmazt tömöríti, hasonlóan a rázáshoz, de a relatív dielektromos állandó hányadosok görbéi jellegükben eltérnek a rázott minta dielektromos hányados görbéitől. Míg a különböző betöltésekből eredő különböző minta sűrűséget teljesen vagy részben korrigálta az LLL sűrűségkorrekció, addig a mintákban a nyomás hatására létrejött, eltérő halmaztömörödöttségek korrigálására hatástalannak bizonyult.

## 5.2.2 UGMA tesztcella

### 5.2.2.1 Az LLL sűrűségkorrekció és a betöltések vizsgálata

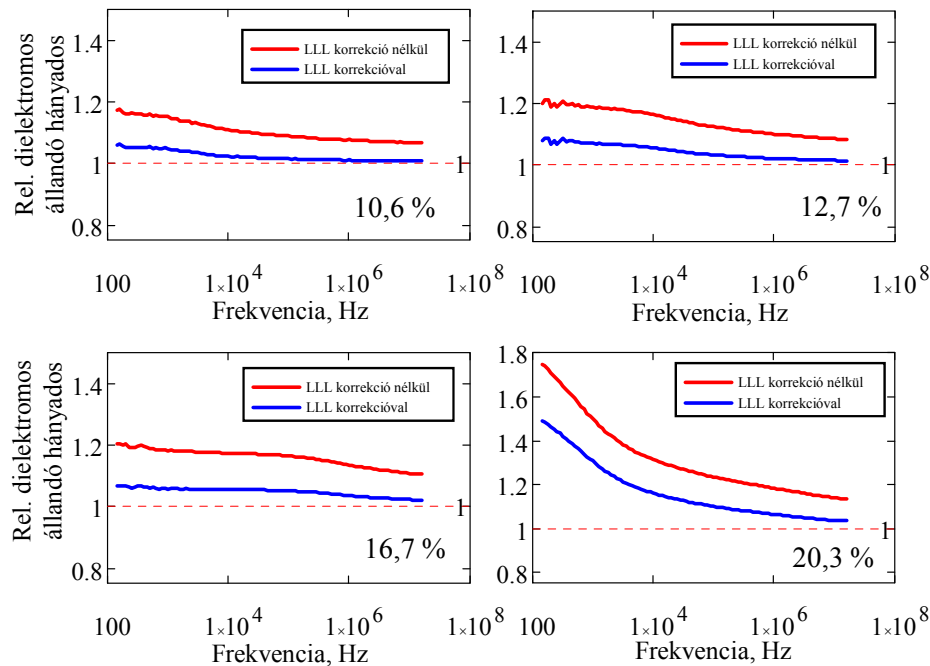
A 36. ábrán az UGMA tesztcellával mért relatív dielektromos állandó hányadosok láthatók a frekvencia függvényében 11,2 % és 28,8 % közötti nedvességtartalmú kukorica esetén.



36. ábra A 11,5 %-28,8 % nedvességtartalmú kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosai ( $\epsilon'_{\text{lassú}}/\epsilon'_{\text{gyors}}$ ) a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, az UGMA tesztcellával mérve

A hányadosok értéke a korrekció után 100 kHz felett maximum +0,07 eltéréssel megközelíti az egyet. Az LLL sűrűségkorrekció minden esetben csökkenti a relatív dielektromos állandó hányados értékét azonban a mérőfrekvencia csökkenésével és a minta nedvességtartalmának növekedésével csökken a sűrűségkorrekció hatékonysága. Bár a 19,6 % és 31,0 % nedvességű kukorica minták esetén a sűrűségkorrekció közel 1 tizeddel csökkenti a relatív dielektromos állandó hányados értékét 100 kHz alatt, de a hányados eltérése 1-től e mintáknál 0,1 - 0,4 közötti érték ebben a frekvenciatartományban.

A görbék jellegéből azt feltételeztem, hogy a korrekció azért bizonyult kevésbé hatékonynak az UGMA tesztcellánál, mert az 1 MHz alatti frekvenciákon megjelenő vezetési hatások, mint az elektród polarizáció és a Maxwell-Wagner relaxáció keveredik a kukoricaszemek orientációjából fakadó hatásokkal. A hipotézist szóján teszteltem. A különböző betöltések relatív dielektromos állandó hányados görbéi 10,6 % és 16,7 % közötti nedvességű szójamintákon a 37. ábrán láthatók.

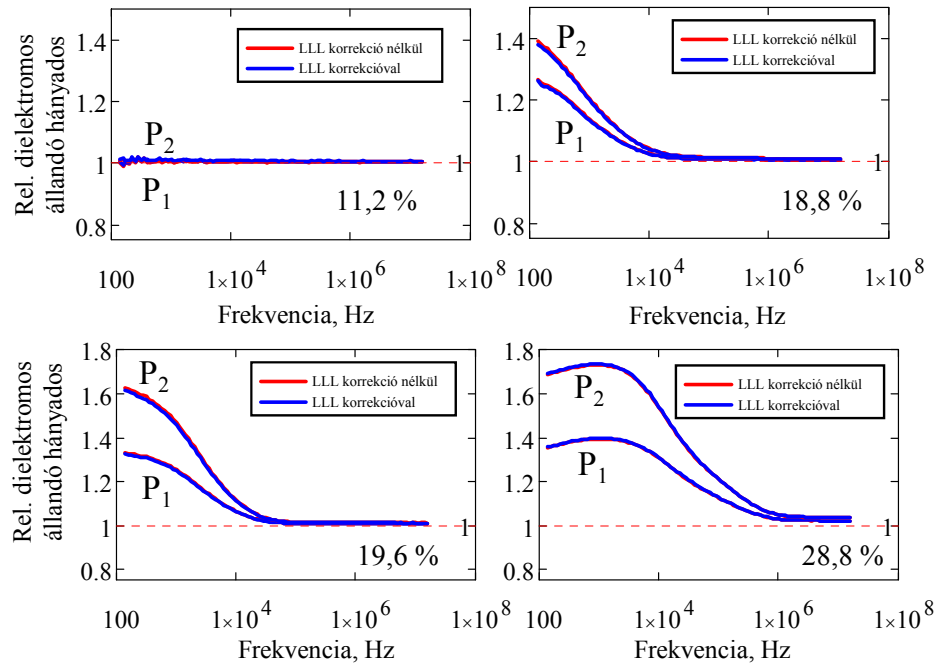


37. ábra A 10,6 %-20,3 % nedvességtartalmú szója minták relatív dielektromos állandó hányadosai ( $\epsilon'_{\text{lassú}}/\epsilon'_{\text{gyors}}$ ) a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, az UGMA tesztcellával mérve

A 37. ábrán látható szója minták a relatív dielektromos állandó hányados értéke sűrűség korrekció után a 0 és +0,1 közötti változik a teljes frekvenciatartományban kivéve a 20,3 %-os mintát. Az LLL sűrűségkorrekció az általam vizsgált frekvenciatartományban hatékonynak bizonyult az eltérő betöltésekből fakadó sűrűségkülönbségek csökkentésére 16,7 % nedvességtartalom alatt. A 20,3 % nedvességű mintánál a görbe meredeken nő a 100 kHz alatti frekvenciákon. A maximális eltérés az ideális korrekciótól +0,5. Az eredményekből nem dönthető el egyértelműen, hogy a hipotézisem a kukorica szemek orientációjára vonatkozóan igaznak bizonyult-e. A kérdés megválaszolásához további vizsgálatok lennének szükségesek, melyek nem e doktori munka tárgya.

#### 5.2.2.2 Az LLL sűrűségkorrekció és a nyomás vizsgálata

A 38. ábrán a 11,2 % - 28,8 % nedvességtartalmú kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosai láthatók a frekvencia függvényében  $P_1 = 1,8 \text{ kPa}$  és  $P_2 = 3,5 \text{ kPa}$  nyomáson:

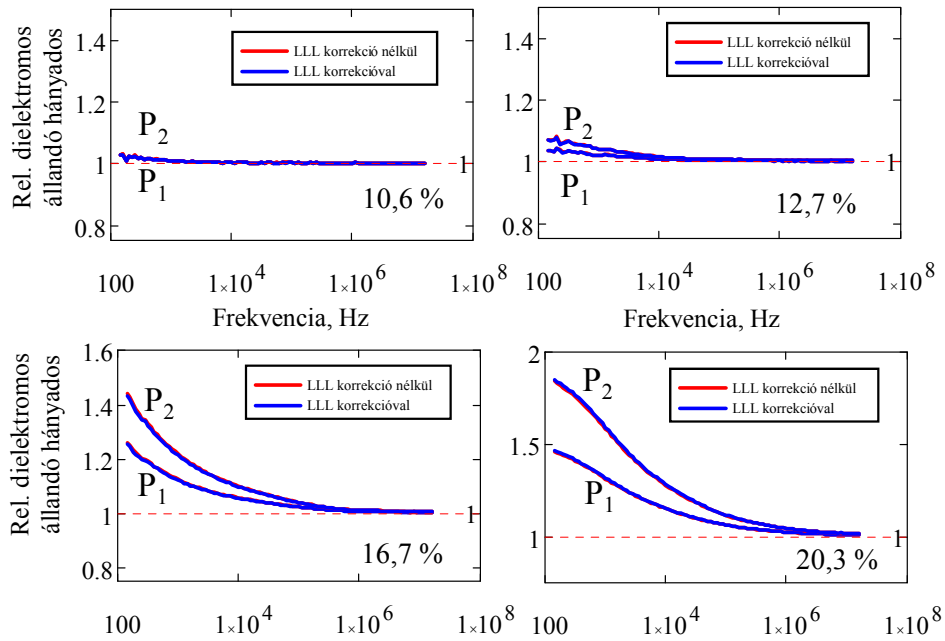


38. ábra A 11,2 %-28,8 % nedvességtartalmú kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosai,  $\varepsilon'_{(P1)}/\varepsilon'_{gyors}$  és  $\varepsilon'_{(P2)}/\varepsilon'_{gyors}$ , a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, az UGMA tesztcellával mérve  $P1 = 1,8 \text{ kPa}$  és  $P2 = 3,5 \text{ kPa}$

A 38. ábrán az LLL sűrűségkorrekciónak elhanyagolható a hatása a relatív dielektromos állandó hányados görbéin a teljes frekvenciatartományban függetlenül a kukorica minta nedvességtartalmától és az alkalmazott nyomás nagyságától.

Megvizsgáltam az LLL sűrűségkorrekció működését  $P1 = 1,8 \text{ kPa}$  és  $P2 = 3,5 \text{ kPa}$  nyomást alkalmazva 10,6 % - 20,3 % nedvességtartalmú szója mintákon is (39. ábra):





39. ábra A 10,6 %-20,3 % nedvességtartalmú szója minták relatív dielektromos állandó hányadosai,  $\epsilon'_{(P1)}/\epsilon'_{gyors}$  és  $\epsilon'_{(P2)}/\epsilon'_{gyors}$ , a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, az UGMA tesztcellával mérve,  $P_1 = 1,8 \text{ kPa}$  és  $P_2 = 3,5 \text{ kPa}$

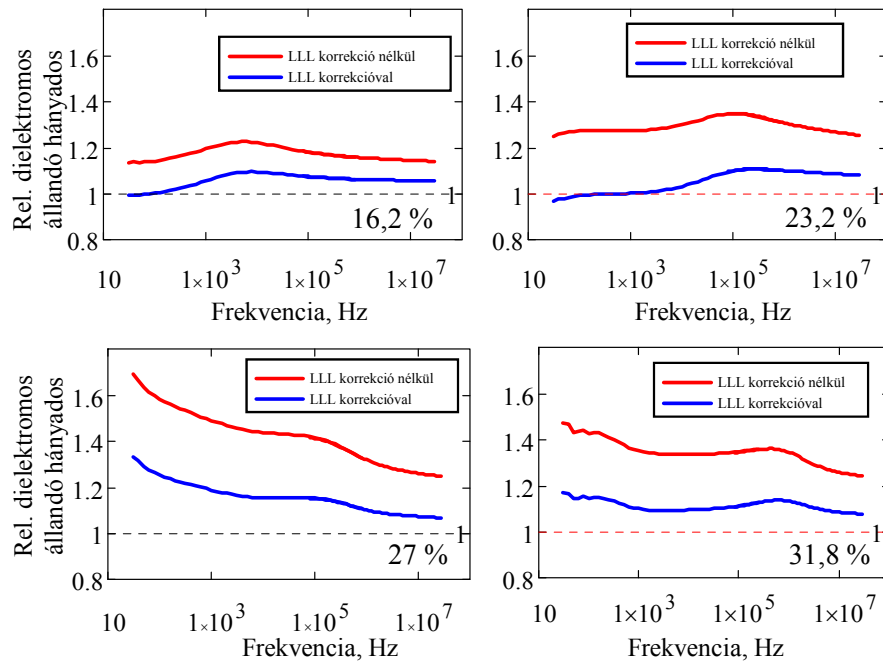
A relatív dielektromos állandó hányados görbékre az LLL sűrűségkorrekciónak elhanyagolható a hatása a minta nedvességtartalmától, az alkalmazott nyomás nagyságától és a frekvenciától függetlenül.

### 5.2.3 Hengerkondenzátor tesztcella

Az előzőkből megállapítható, hogy a két párhuzamos falú tesztcellánál az LLL sűrűségkorrekció a betöltésekből fakadó eltéréseket kompenzálja. A mintákon nyomást alkalmazva, az így létrejött sűrűségkülönbségek kiküszöbölésére az LLL sűrűségkorrekció hatástalan. A továbbiakban megvizsgáltam, hogy a tapasztalt tesztcella specifikusak-e, azaz hasonló következtetésekre jutunk-e, ha tesztcellaként hengerkondenzátort alkalmazunk.

#### 5.2.3.1 Az LLL sűrűségkorrekció és a betöltések vizsgálata

A 40. ábrán 16,2 %-31,8 % nedvességű kukorica minták relatív dielektromos állandó hányados görbéit ábrázoltam, hengerkondenzátort használva tesztcellaként:

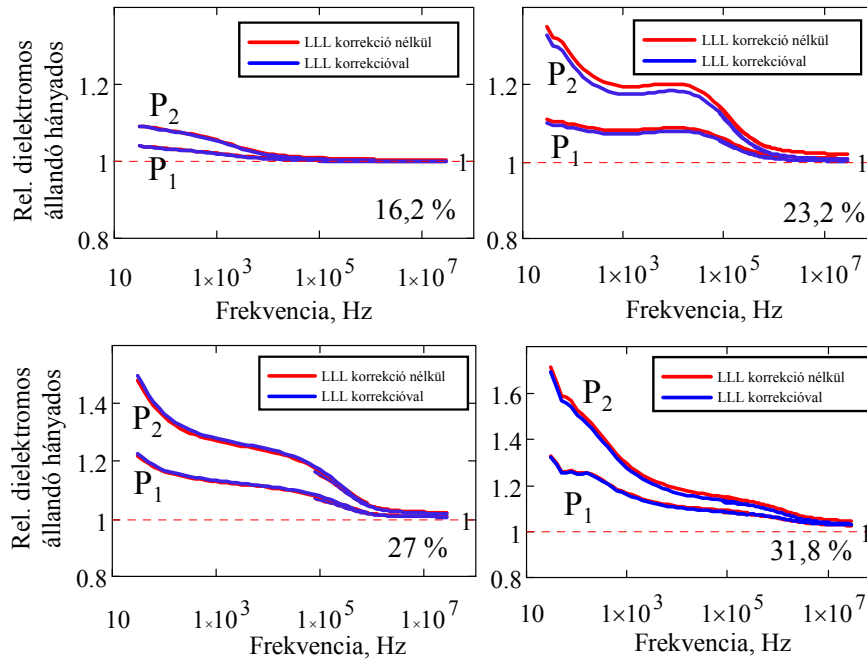


40. ábra A 16,2 %-31,8 % nedvességtartalmú kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosai ( $\epsilon'_{\text{lassú}}/\epsilon'_{\text{gyors}}$ ) a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, a hengerkondenzátor tesztcellával mérve

Az LLL sűrűségkorrekció jelentős javulást okozott a hányados értékében minden nedvességtartalmon a teljes frekvenciatartományban. A két nedvesebb, 27 % és 31,8 % nedvességű minták eltérése az 1-től +0,1 és +0,3 között változik a frekvenciától függően, de sosem éri el az 1-et még 1 MHz frekvencia felett sem. A 16,2 % és 23,2 % nedvességű mintáknál a hányados értéke 1 kHz frekvencia alatt +0,05 illetve 1, ami ellentmond az eddig tapasztaltakkal. A GAC és UGMA tesztcelláknál az LLL a relatív dielektromos állandó hányados értékeire 1 MHz frekvencia felett kaptunk közel 1-et és az 1 MHz alatti frekvenciákon az egytől való eltérés nőtt a frekvencia csökkenésével.

### 5.2.3.2 Az LLL sűrűségkorrekció és a nyomás vizsgálata

Megvizsgáltam az LLL sűrűségkorrekció hatásosságát  $P1 = 1,5 \text{ kPa}$  és  $P2 = 3,0 \text{ kPa}$  nyomáson 16,2 - 31,8 % nedvességű kukorica mintákon (41. ábra).



41. ábra A 16,2 % és 31,8 % nedvességu kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosai,  $\epsilon'_{(P1)}/\epsilon'_{gyors}$  és  $\epsilon'_{(P2)}/\epsilon'_{gyors}$ , a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, a hengerkondenzátor tesztcellával mérve. P1 = 1,5 kPa és P2 = 3,0 kPa

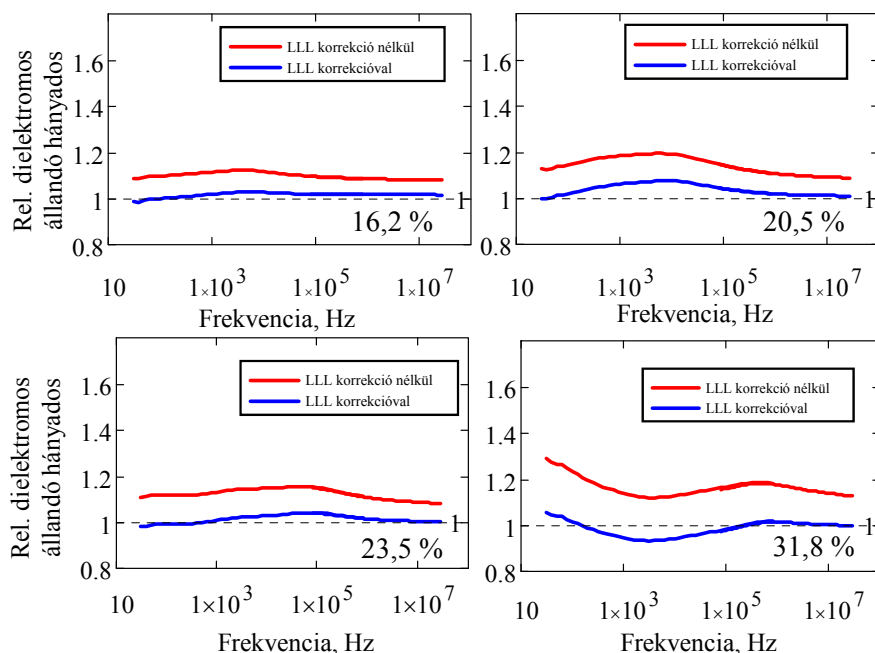
A relatív dielektromos állandó hányados görbéi ugyanazt a tendenciát mutatják, amint azt a GAC és UGMA tesztcelláknál tapasztaltunk: Az LLL sűrűségkorrekciónak elhanyagolható a hatása a relatív dielektromos állandó hányados görbékre minden nedvességtartalmon és frekvencián.

Mindezek ahhoz a feltételezéshez vezettek, hogy a tesztcellánál a különböző betöltések esetén a jelenségért nem az LLL sűrűségkorrekció felelős. A hengerkondenzátor tesztcellánál a számításokhoz a gabona átlagsűrűségét használtam a teljes térfogatra vonatkoztatva. Ezáltal a tesztcella elektromosan aktív részében pontatlanná vált a sűrűség meghatározás, mivel más a sűrűség a középső elektród felett és a tesztcella mellett. Így a különböző betöltés miatt létrejött sűrűség különbség a tesztcella elektromosan aktív zónájában jóval nagyobb lett, mint a központi elektród feletti részben, amelynek csekély hatása van a dielektromos mérésre. (A hengerkondenzátor központi elektródja 72 milliméterrel alacsonyabb volt, mint a külső elektród magassága.). Feltevést igazolandó a hengerkondenzátor tesztcella módosítása (központi elektród meghosszabbítása) után megismételtem a méréseket.

## 5.2.4 Módosított hengerkondenzátor tesztcella

### 5.2.4.1 Az LLL sűrűségkorrekció és a betöltések vizsgálata

A központi elektród meghosszabbításával módosított hengerkondenzátor tesztcellával végzett a mérések eredményei a 42. ábrán láthatók:

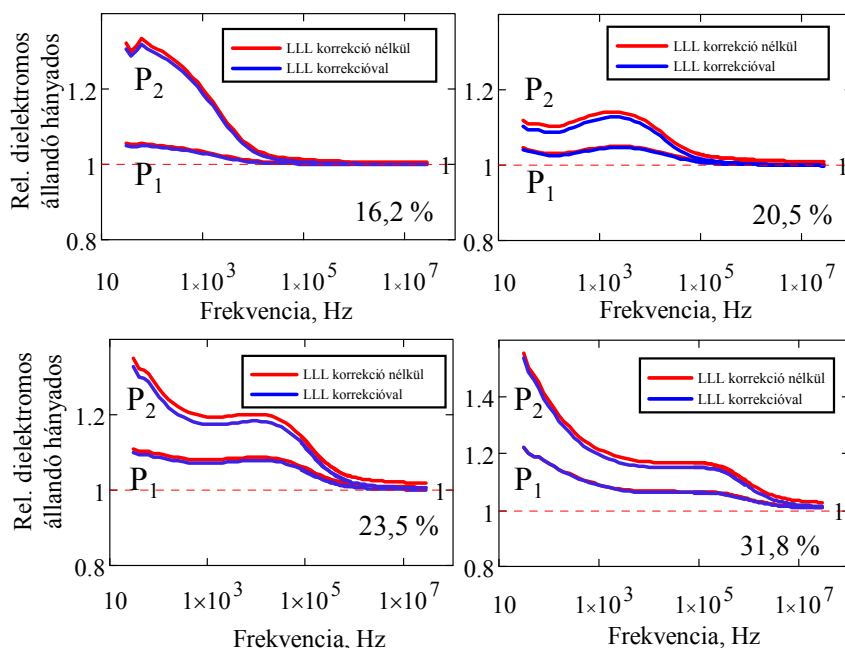


42. ábra A 16,2 %-31,8 % nedvességtartalmú kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosai ( $\epsilon'_{\text{lassú}}/\epsilon'_{\text{gyors}}$ ) a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, a módosított hengerkondenzátor tesztcellával mérve

A feltevésém igaznak bizonyult. A központi elektród meghosszabbításával a relatív dielektromos állandó hányados értékében a sűrűségkorrekció alkalmazásával jelentős javulást tudtam elérni. A tesztcella módosításával az egyes betöltésekhez tartozó relatív dielektromos állandó értékeire alkalmazva az LLL sűrűségkorrekciót a relatív dielektromos állandó hányados értéke maximum  $\pm 0,05$  eltéréssel megközelítette 1-et minden nedvességtartalomnál és frekvencián.

### 5.2.4.2 Az LLL sűrűségkorrekció és a nyomás vizsgálata

A módosított hengerkondenzátorban elhelyezkedő kukorica minta tetején  $P_1 = 1,9$  kPa és  $P_2 = 3,9$  kPa nyomásokat alkalmaztam. A relatív dielektromos állandó hányadosok az LLL sűrűségkorrekció előtt és után a 43. ábrán láthatók:



43. ábra A 16,2 % és 31,8 % nedvességű kukorica minták relatív dielektromos állandó hányadosai,  $\epsilon'_{(P1)}/\epsilon'_{gyors}$  és  $\epsilon'_{(P2)}/\epsilon'_{gyors}$ , a frekvencia függvényében, LLL sűrűségkorrekció előtt és után, a módosított hengerkondenzátor tesztcellával mérve. P1 = 1,9 kPa és P2 = 3,9 kPa

A 43. ábrán tesztcella módosítása után az LLL sűrűségkorrekció alkalmazásával a relatív dielektromos állandó hányados csak kis mértékben változik a teljes frekvenciatartományban. A változás nagyobb a 3,9 kPa nyomás esetén. Az LLL sűrűségkorrekció eredményességét megvizsgálva megállapíthatjuk, hogy a nyomás hatására a mintában létrejött sűrűség különbségeket nem tudta eliminálni.

***Összehasonlítva a GAC, UGMA, hengerkondenzátor és módosított hengerkondenzátor tesztcellákkal végzett méréseket az alábbi következtetéseket vontam le:***

1. A Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció a különböző betöltések hatására létrejött sűrűségkülönbségek hatását, a számított nedvességtartalomban ezáltal létrejövő hibát 11,2 % - 31,8 % nedvességtartalmú kukorica mintákon eredményesen korrigálta a GAC, az UGMA és a módosított hengerkondenzátor tesztcellákkal történt mérések során 100 Hz és 10 MHz között.
2. A Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció a betöltések hatására létrejött sűrűségkülönbségek hatását eredményesen korrigálta 10,6 % - 16,7 % nedvességtartalmú szója mintákon 100 kHz és 10 MHz között az UGMA tesztcellával történt mérések során.
3. A Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció hatékonyan működik a rázás által okozott sűrűségkülönbségek korrigálására, de nem eredményes a nyomás hatását kiküszöbölni 11,2 % -

31,8 % nedvességtartalmú kukorica mintákon és 10,6 % - 16,7 % nedvességtartalmú szója mintákon a GAC, az UGMA és a módosított hengerkondenzátor tesztcellákkal történt mérések során 100 Hz és 10 MHz között.

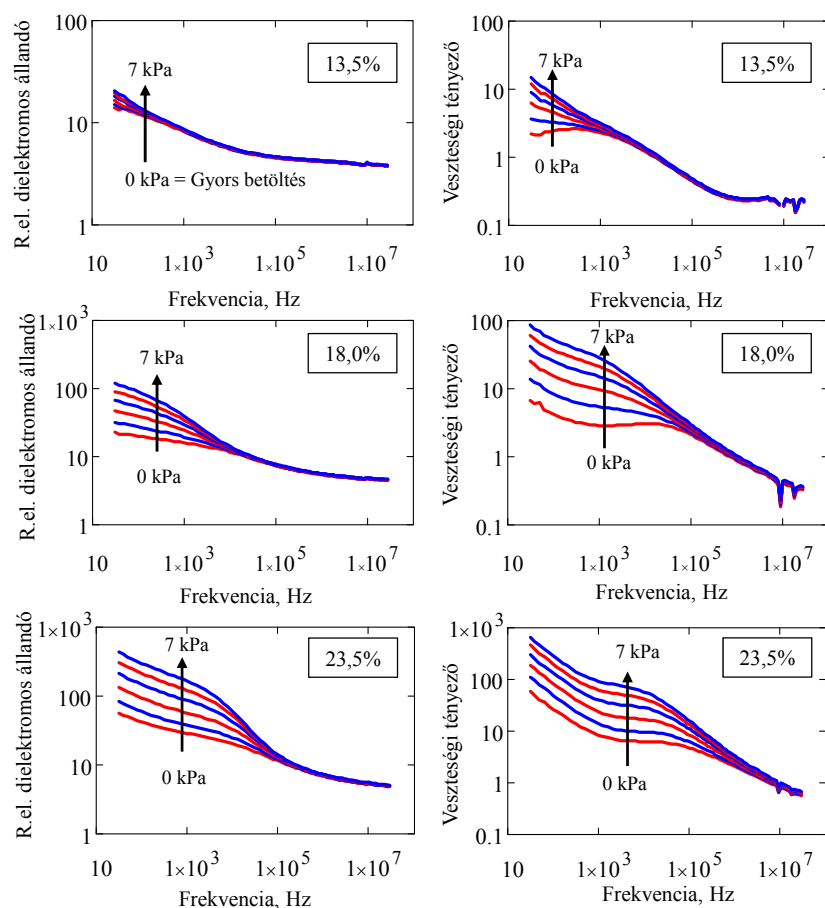
4. A négy különböző tesztcellával 11,2 % - 31,8 % nedvességtartalmú kukorica mintákon és 10,6 % - 16,7 % nedvességtartalmú szója mintákon történt mérések során megállapítottam, hogy a nyomás hatása a relatív dielektromos állandó görbékre különbözik a rázás hatásától 100 kHz és 10 MHz frekvenciatartományban.
5. A hengerkondenzátor tesztcellával végzett méréseink alapján megállapítottam, hogy ha a tesztcella középső elektródja rövidebb, mint a külső elektródja, akkor a középső elektród mellett és felett kialakuló különböző mintasűrűség miatt a Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció eredményessége jelentősen romlik. A probléma megoldható a középső elektród meghosszabbításával. A gabona nedvességmérésében a sűrűségkülönbségek okozta hibák kiküszöböléséhez elengedhetetlen és alapvető a minta pontos sűrűségének ismerete a tesztcella elektromosan aktív részében.

### **5.3 DIELEKTROMOS SPEKTRUMOK NYOMÁSFÜGGÉSE**

Az előző fejezetben megmutattam, hogy a nyomásnak más a hatása a dielektromos görbékre, mint a különböző betöltési módoknak. Az eltérés abban is megmutatkozott, hogy a mintán akár a legkisebb nyomást is alkalmazva az LLL sűrűségkorrekció a relatív dielektromos állandó hányados értékeire nem hatott. Ebben a fejezetben a relatív dielektromos állandó és a veszteségi tényező változását mutatom be 1,4 kPa-19,6 kPa közötti nyomások hatására a frekvencia függvényében. Az eredményeket az egyes tesztcellákra külön közlöm.

#### **5.3.1 GAC tesztcella**

A 44. ábrán a 0 - 14,29 kPa nyomások hatása a relatív dielektromos állandóra és a veszteségi tényezőre követhető nyomon 13,5 % - 23,5 % nedvességtartalmú kukorica mintákon, ahol 0 kPa a gyors betöltésnek felel meg.



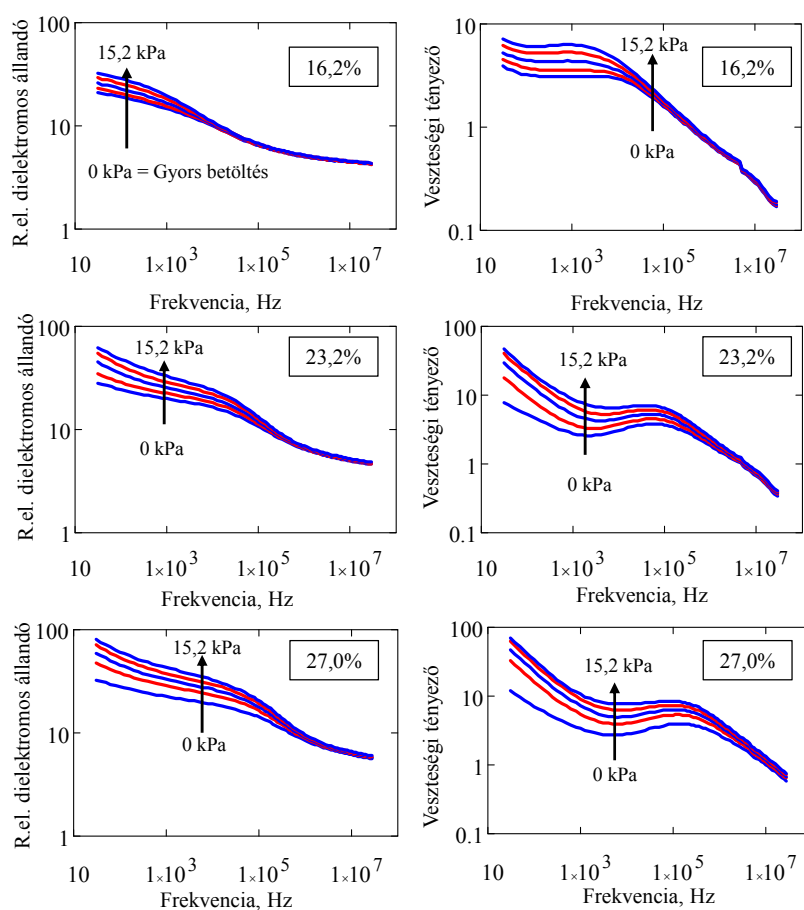
44. ábra Egy 13,5 %, 18,0 % és egy 23,5 % nedvességtartalmú kukorica minta relatív dielektromos állandójának és veszteségi tényezőjének változása a nyomás hatására a frekvencia függvényében GAC tesztcellával mérve. Az alkalmazott nyomások 1,4 kPa; 2,8 kPa; 4,2 kPa; 7 kPa. A 0 kPa = gyors betöltés.

A 44. ábrán látható kukorica minták relatív dielektromos állandó és veszteségi görbéi a növekvő nyomás hatására és a nedvességtartalom növekedésével egyre jobban szétválnak 100 kHz alatt. A relatív dielektromos állandó értéke már 1,4 kPa nyomás hatására is körülbelül tízzel lesz nagyobb, mint a minta terheletlen állapotában mért relatív dielektromos állandó 18 % nedvességű kukorica mintánál. A nyomás hatása kisebb a 100 kHz feletti frekvenciatartományban. A relatív dielektromos állandó görbéken meghatározható egy olyan frekvenciatartomány, melyben a nyomásnak elhanyagolható a hatása. E tartomány a 13,5 % nedvességű mintán körülbelül 1 kHz felett, a 18 %-os mintánál 10 kHz felett és a 23,5 % nedvességtartalmú kukorica esetén 100 kHz felett található. Mindhárom nedvességtartalomnál a 0 kPa nyomáshoz tartozó veszteségi görbéken megfigyelhető két vezetési hatás: az elektród polarizáció és a Maxwell-Wagner relaxáció. A Maxwell-Wagner relaxációt a veszteségi csúcs, a veszteségi tényező maximuma jelzi a karakterisztikus frekvencián. Az elektród polarizáció könnyen felismerhető, mert ilyenkor a relatív

dielektromos állandó és a veszteségi tényező görbék képe egy egyenes a frekvencia függvényében log-log diagramon ábrázolva, és a veszteségi tényező nagyobb, mint a relatív dielektromos állandó. A nyomás növekedésével az elektród polarizáció egyre jobban dominálja a dielektromos görbét minden nedvességtartalomon. A Maxwell-Wagner relaxációt jellemző veszteségi csúcs eltolódik a nagyobb frekvencia értékek felé. Nehézséget okoz azonban annak az elektród polarizáció és a Maxwell-Wagner relaxációs frekvenciatartományainak pontos meghatározása.

### 5.3.2 Hengerkondenzátor tesztcella

A 45. ábrán a 0-15,2 kPa nyomások hatása látható a relatív dielektromos állandóra és a veszteségi tényezőre 13,5 % - 23,5 % nedvességtartalmú kukorica mintán.



45. ábra Egy 16,2 %, 23,2 % és egy 27,0 % nedvességtartalmú kukorica minta relatív dielektromos állandójának és veszteségi tényezőjének változása a nyomás hatására a frekvencia függvényében hengerkondenzátor tesztcellával mérve. Az alkalmazott nyomások: 1,5 kPa; 7,6 kPa; 11,4 kPa; 15,2 kPa. A 0 kPa a minta gyors betöltését jelenti.

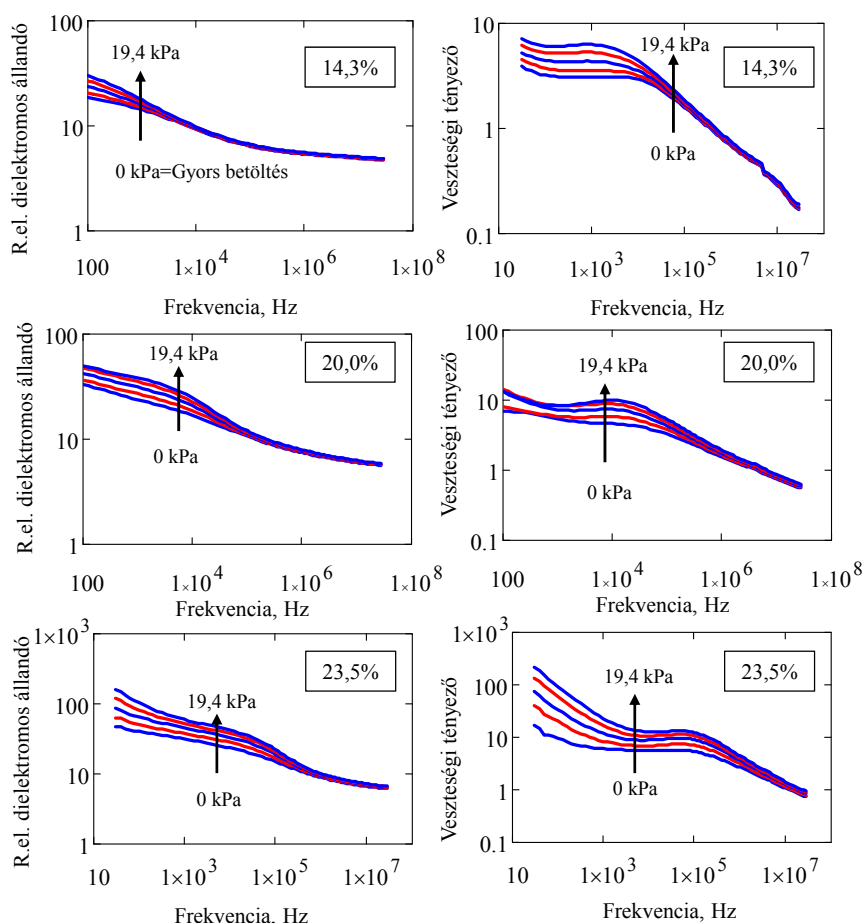
A 45. ábrán látható relatív dielektromos állandó és veszteségi tényező görbéken a nyomás hatása ugyanúgy jelenik meg, mint ahogy azt a GAC tesztcellánál láttuk. A görbék lefutása



alapvetően nem változik a nyomás hatására, azonban az 1 kHz alatti frekvenciákon az elektród polarizáció egyre inkább dominánssá válik a nyomás nagyságának növekedésével. A relatív dielektromos állandó görbéken meghatározható egy olyan frekvenciatartomány, melyben a növekvő nyomásnak nincs jelentős hatása a relatív dielektromos állandóra. Ez a frekvenciatartomány a 16,2 % nedvességtartalmú kukorica mintán körülbelül 100 kHz felett, a 23,2 %-os mintánál 1 MHz felett és a 27,0 % minta esetében 10 MHz felett található. A veszteségi tényező görbéken ezekben a frekvenciatartományokban a nyomás hatása kis mértékben ugyan, de különbséget okoz. A nyomás hatása a 100 kHz alatt nagyobb, mint a frekvencia felett.

### 5.3.3 Módosított hengerkondenzátor tesztcella

A 46. ábrán 0 - 19,4 kPa nyomások hatása látható a relatív dielektromos állandóra és a veszteségi tényezőre 14,3 % - 20,0 % nedvességtartalmú kukorica mintán.

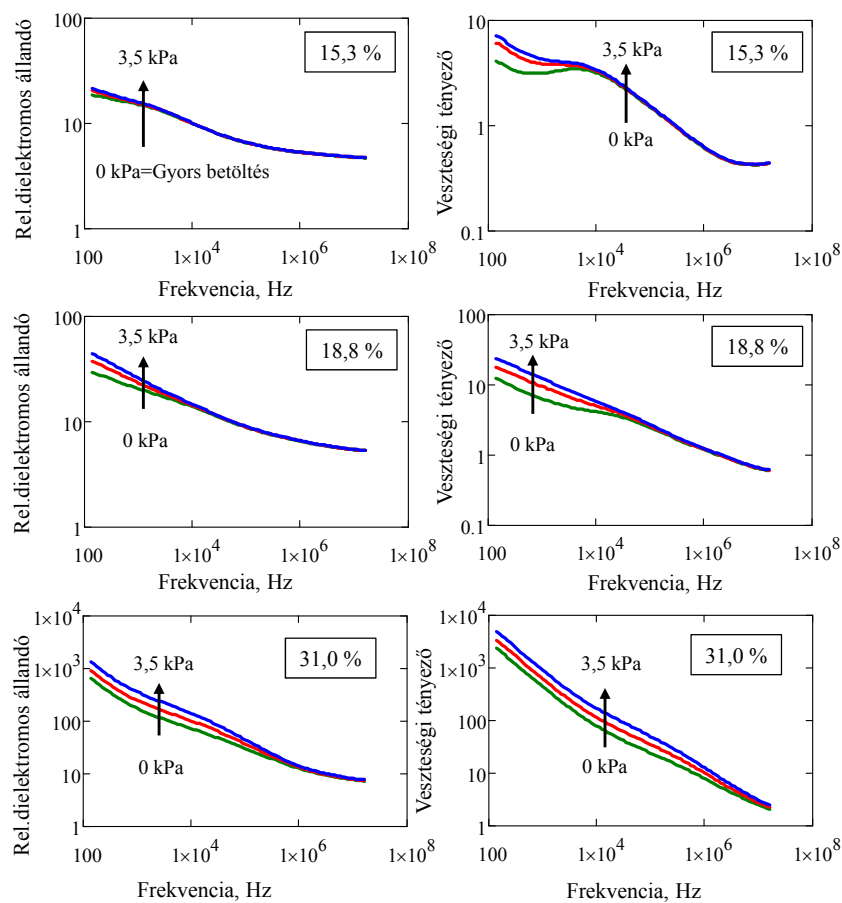


46. ábra Egy 14,3 %, 20,0 % és egy 23,5 % nedvességtartalmú kukorica minta relatív dielektromos állandójának és veszteségi tényezőjének változása a nyomás hatására a frekvencia függvényében módosított hengerkondenzátor tesztcellával mérve. Az alkalmazott nyomások: 1,9 kPa; 3,9 kPa; 9,7 kPa; 19,4 kPa. A 0 kPa a minta a gyors betöltését jelenti.

A 46. ábrán látható minták relatív dielektromos állandó és veszteségi tényező görbéi is hasonlóan a GAC és hengerkondenzátor tesztcellánál tapasztaltakhoz a nyomás hatására elválnak egymástól. A relatív dielektromos állandó görbéken a nyomás hatása elhanyagolható a 14,3 % nedvességű kukorica mintán körülbelül 100 kHz felett, a 20,0 %-os mintánál 1 MHz felett és a 23,5 % minta esetében 10 MHz felett található. Az elektródpolarizációs egyenes a nyomás növekedésével egyre dominánssá válik a 10 kHz alatti frekvenciatartományban. Veszteségi csúcs a nagyobb frekvenciák felé tolódik el.

#### **5.3.4 UGMA tesztcella**

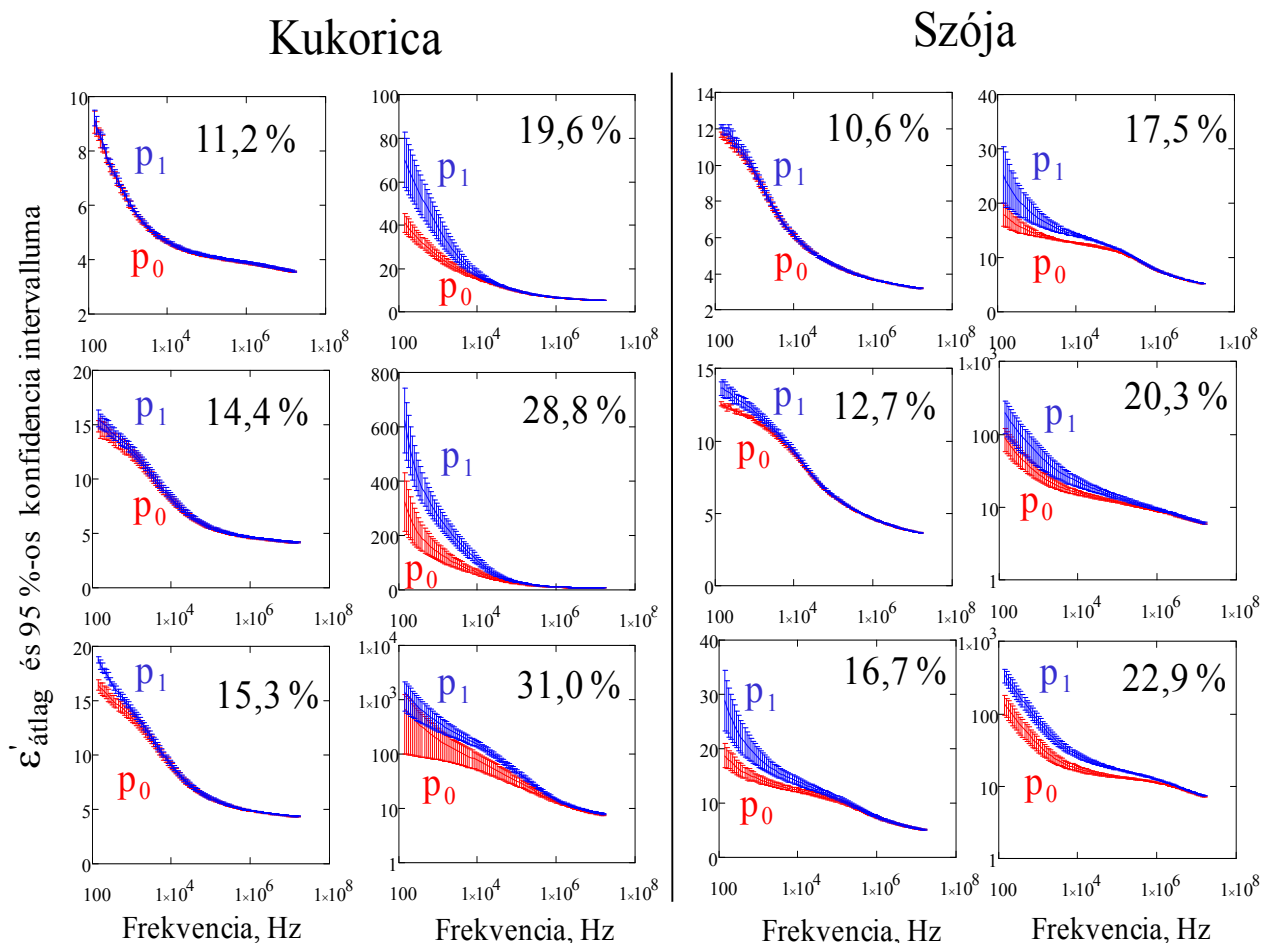
Az UGMA tesztcellával végzett terheléses kísérletek során a dielektromos méréseket a nyomás megszüntetése után végeztem el, ellentétben a GAC, hengerkondenzátor és a módosított hengerkondenzátorral történt mérésekkel, melyek során a dielektromos spektrumok felvétele nyomás alatt történt. A nyomás ilyen módon történt alkalmazásával lehetőségem nyílt megvizsgálni, hogy a terhelés megszűnése után kimutatható-e a nyomás hatása a dielektromos görbéken a 10 MHz alatti frekvenciatartományban. A vizsgálatokhoz kis nyomásértékeket 1,77 kPa, 3,55 kPa alkalmaztam a legkisebb, a dielektromos görbéken már szignifikáns különbséget okozó nyomás meghatározásához. A statisztikai elemzéseket a relatív dielektromos állandó értékeire végeztem el, mert ez a jellemző határozza meg a számított nedvességtartalom értékét. A 47. ábrán a nyomás hatása látható a relatív dielektromos állandóra és a veszteségi tényezőre 14,3 % - 20,0 % nedvességtartalmú kukorica mintán.



47. ábra Egy 15,3 %, 18,8 % és egy 31,0 % nedvességtartalmú kukorica minta relatív dielektromos állandójának és veszteségi tényezőjének változása a nyomás hatására a frekvencia függvényében UGMA tesztcellával mérve. A görbék minden nyomásértéken 3 ismételtes átlagából származnak. Az alkalmazott nyomások: 1,8 kPa; 3,5 kPa. A 0 kPa minta a gyors betöltését jelenti.

A 47. ábrán látottakból megállapítható, hogy bár a dielektromos méréseket a nyomás megszűnése után vettem fel, a relatív dielektromos állandó és veszteségi tényező a nyomás hatására megváltozik. A változás nagysága függ a minta nedvességtartalmától és a frekvenciától. Minél szárazabb volt a minta, annál kisebb frekvenciákon jelentkezik a nyomás hatása. A 15,3 %-os nedvességű mintán az általunk alkalmazott nyomásoknak nincs hatása 10 kHz felett. A 10 kHz alatti frekvenciákon a legnagyobb változás a veszteségi tényező görbén tapasztalható: a nyomás növekedésével a veszteségi tényező és relatív dielektromos állandó megnő, de ez utóbbi csak kis mértékben változik. A nedvességtartalom növekedésével, a nyomás hatása egyre nagyobb frekvenciákon jelenik meg.

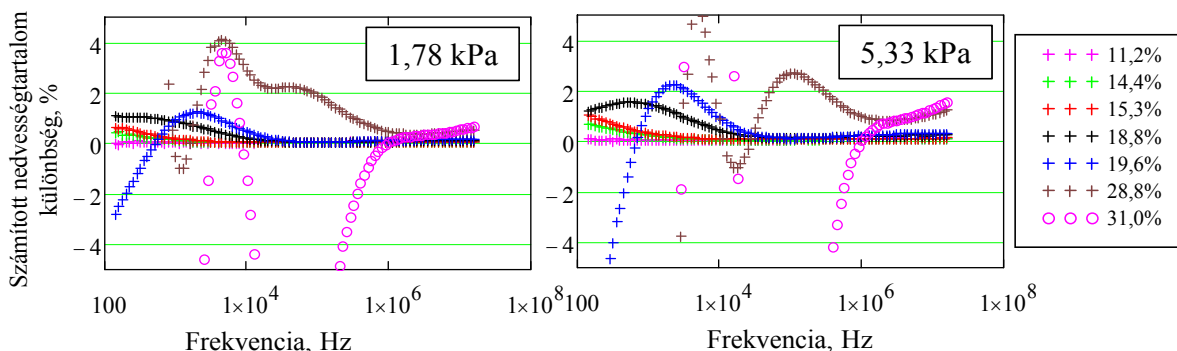
A kukorica és a szója relatív dielektromos állandó átlagaiban 30 N terhelőerő hatására (ami 5,3 kPa nyomásnak felel meg) szignifikáns különbséget tapasztaltam ( 48. ábra)



48. ábra Kukorica és szója relatív dielektromos állandó (három ismételéből származó) átlaga és 95 %-os konfidencia intervalluma a frekvencia függvényében. Piros színnel a terheletlen állapotot és kék színnel az alkalmazott nyomást jelölt jelöltem, ahol  $P_1 = 5,3 \text{ kPa}$

A dielektromos méréseket a terhelés megszűnte után elvégezve, kimutatható szignifikáns a hatás a relatív dielektromos állandó értékekben. Kukorica esetén 15,3 %, szója minták esetén 12,7 % nedvességtartalom felett jelentkezik szignifikáns különbség. A száraz mintáknál 1 kHz alatt, a nedveseknél (31%-os kukorica és 22,9% szója minták esetén) 1 MHz alatti frekvencia tartományban mutatható ki szignifikáns eltérés.

A számított nedvességtartalom értékében a  $P_1 = 1,78 \text{ kPa}$  és  $P_3 = 5,33 \text{ kPa}$  nyomás hatására közvetetten megjelenő különbséget a 49. ábrán ábrázoltam a frekvencia függvényében.



49. ábra Három ismétlésből származó átlag számított nedvességtartalom különbség a frekvencia függvényében. A különbség az adott nyomáshoz tartozó számított nedvességtartalom és a terheletlen állapothoz tartozó számított nedvességtartalom különbsége.

A 49. ábrán látható minták nedvességtartalmának kiszámításánál minden esetben alkalmaztunk hőmérséklet és LLL sűrűségkorrekciót és csak ezután vettük a terhelt és terheletlen állapotok különbségeit. Megállapítható, hogy a 18,8 % nedvesség alatti kukoricák számított nedvességtartalom különbsége a nyomás hatására 10 kHz felett közel nulla, 10 kHz alatt maximum 1 % nedvességszázalék az eltérés a terhelt és terheletlen minták számított nedvességtartalom értéke között. Az különbség mindig pozitív volt, azaz a terhelt minta nedvességtartalmát a ténylegesnél nagyobbra becsültük. A 18,8 %-nál nedvesebb kukoricák számított nedvességtartalom különbsége a frekvencia függvényében hol pozitív, hol negatív irányban tér el. Ez az eltérés meghaladhatja akár a  $\pm 4$  nedvességszázalékot is.

***Összefoglalva az 1,41 kPa – 19,6 kPa közötti nyomások relatív dielektromos állandó és veszteségi tényező görbéire gyakorolt hatását megállapíthatjuk a következőket:***

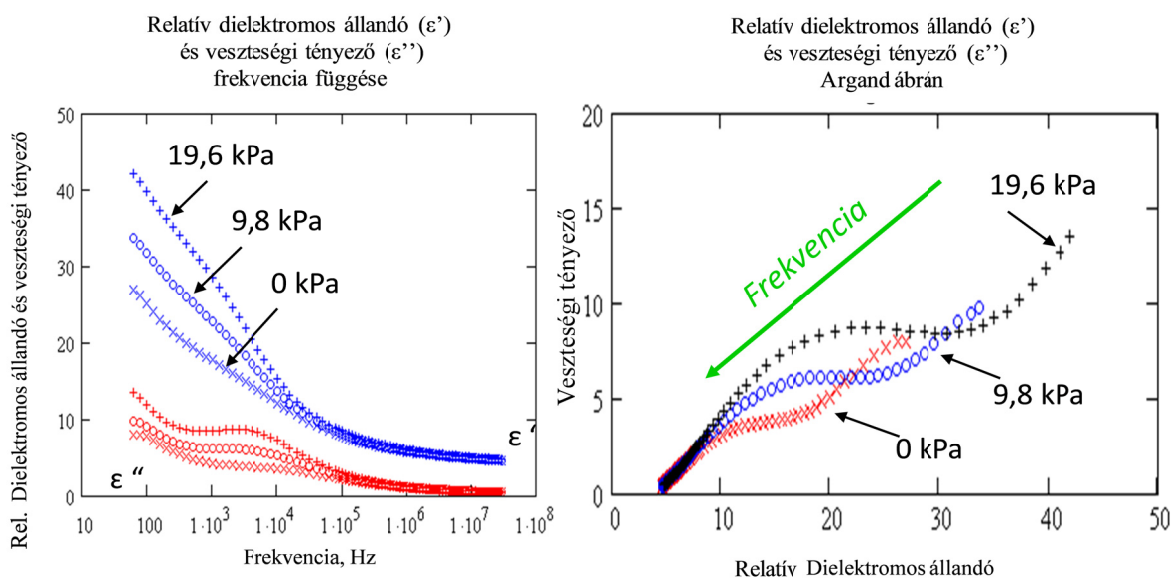
1. Az 1,41 kPa vagy annál nagyobb nyomásoknak a 11,2 %-31 % nedvességtartalmú kukorica minták dielektromos görbéin kimutatható hatása van a 100 Hz-10 MHz frekvenciatartományban.
2. A nyomás hatása akkor is jelentkezik a dielektromos görbéken, ha a dielektromos spektrumok mérése közvetlenül a nyomás megszűnése után történik.
3. A nyomásnak kimutatható hatása van a 11,2 %-31 % nedvességtartalmú kukorica minták dielektromos görbéire a GAC, az UGMA, a hengerkondenzátor és a módosított hengerkondenzátor tesztcellákkal végzett mérések során.
4. A nyomás hatására az egyes vezetési hatások, úgy mint az elektród polarizáció és a Maxwell-Wagner relaxáció jellemző frekvenciatartományai eltolódnak.

5. A nyomás és a minta nedvességtartalmának növekedésével az elektród polarizáció egyre jobban dominál a dielektromos görbéken.

## 5.4 A TERHELÉS HATÁSA AZ ARGAND ÁBRÁKON

A relatív dielektromos állandót és veszteségi tényezőt a frekvencia függvényében ábrázolva egyértelműen látható a nyomás hatása minden tesztcellánál, azonban a vezetési hatások, melyek az alacsony frekvenciás mérések során nehézségeket okoznak, nem választhatók szét. Az adatok elemzése alapján megállapítottam, hogy a dielektromos jellemzők Argand ábrán való megjelenítésével a vezetési hatások láthatóvá és elkülöníthetővé válnak. Vajon a nyomás dielektromos jellemzőkre gyakorolt hatása is jellemezhető Argand paraméterekkel?

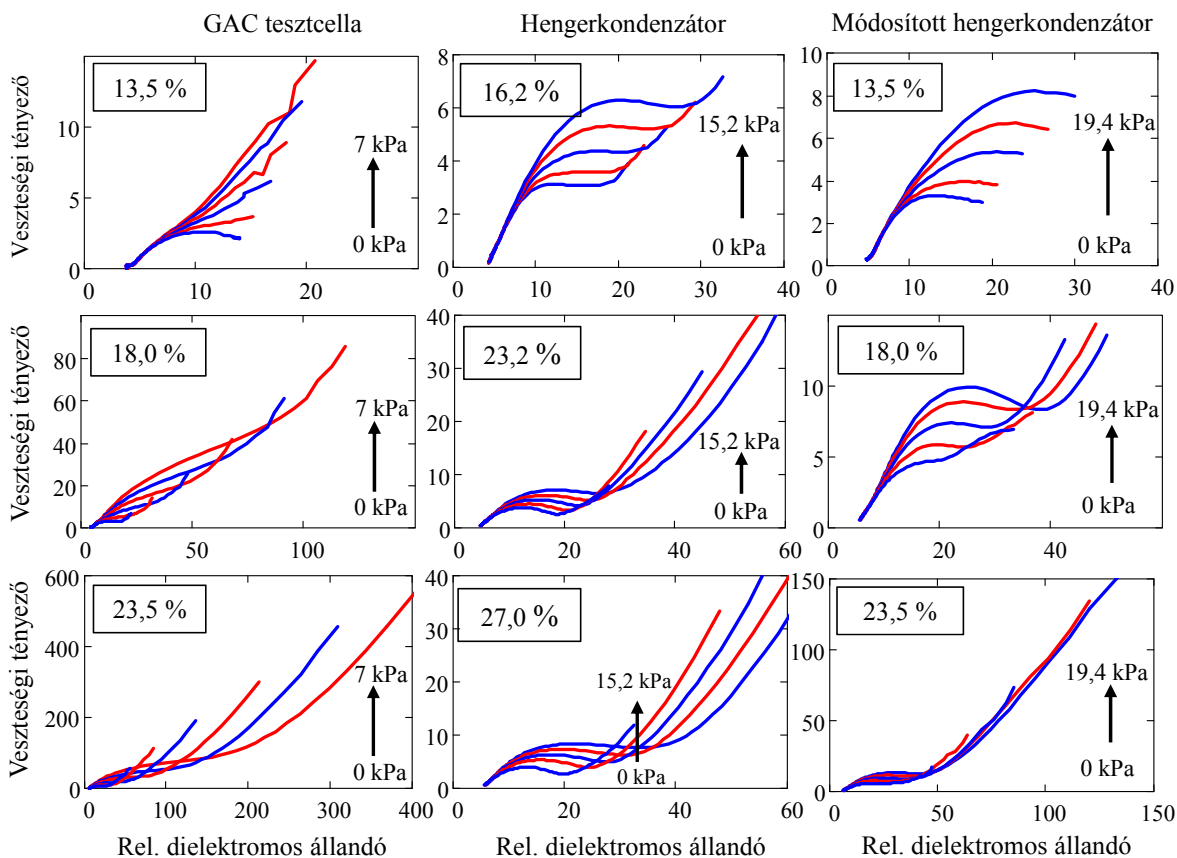
Az 50. ábra bal oldalán a nyomás hatása látható egy 18 %-os kukorica minta relatív dielektromos állandó és veszteségi tényezőjére a frekvencia függvényében, míg a jobb oldalon ugyanazon minta, azonos nyomásokon Argand ábrán való megjelenítése látható.



50. ábra Egy 18 %-os kukorica minta relatív dielektromos állandója és veszteségi tényezője a frekvencia függvényében és Argand ábrán, módosított hengerkondenzátor tesztcellával

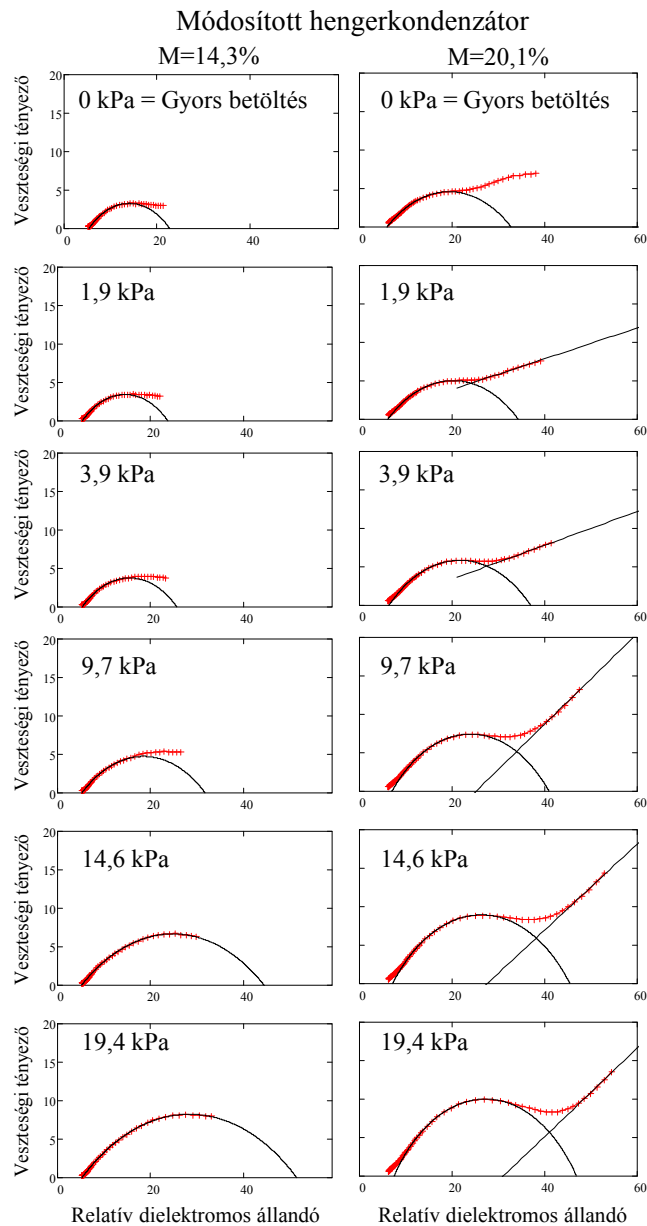
Az Argand ábrán való ábrázolással a Maxwell-Wagner relaxációra jellemző körív és az elektród polarizációt jelző egyenes jól elkülöníthető, és a görbék alakja jellemző maradt. Az alkalmazott nyomás ellenére a görbék leírhatók egy kör és/vagy egy egyenes kombinációjával.

Az 51. ábrán különböző nedvességtartalmú minták Argand görbéit hasonlítottam össze három tesztcellánál abban az esetben, amikor a dielektromos méréseket nyomás alatt végeztem.



51. ábra Különböző nedvességtartalmú kukorica minták Argand ábrái. A GAC, a hengerkondenzátor és a módosított hengerkondenzátor tesztcellákkal végzett dielektromos mérések nyomás alatt történtek.

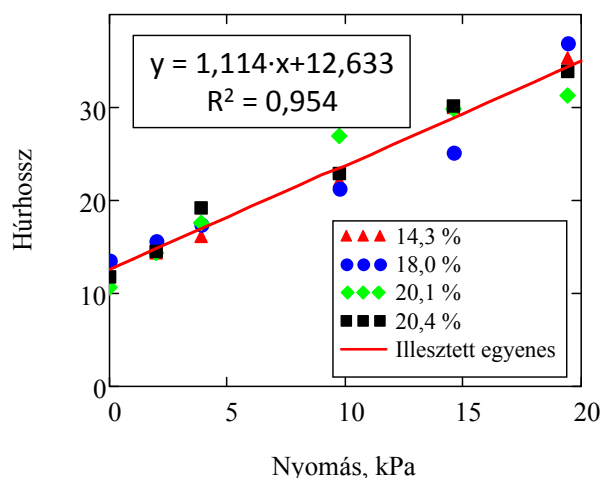
Az ábrából megállapítható, hogy az Argand görbék minden nedvességtartalmon és mindhárom tesztcellánál meghatározott módon változtak, azaz a nyomás hatására a jelleggörbék alakja nem, de a Maxwell-Wagner relaxáció köríve és az elektród polarizáció egyenese többszörösére nőtt. Mindkét hengerkondenzátornál megfigyelhető, hogy a száraz mintáknál a Maxwell-Wagner relaxáció erősödik a nyomás hatására, a majd a minta nedvességtartalmának növekedésével a Maxwell-Wagner körív növekedése mellett egyre inkább az erősödő elektródpolarizáció lesz domináns a görbéken. A GAC tesztcellánál a nyomás hatása hasonló, de amiatt, hogy a tesztcella elektródjai szigetetlenek az elektród polarizáció drasztikusabban jelentkezik már a száraz mintánál is. Ugyanezt tapasztaltam a 3. mellékletben található kukoricáknál is. A kör és egyenes illesztéseket az 52. ábrán mutatom be egy 14,3 % és egy 20,1% nedvességű kukorica mintán.



52. ábra A terhelés hatása száraz és nedves kukoricaminta Argand görbéire

Az illesztéshez használt Mathcad14 programmal írt algoritmus (Gillay 2003) az illesztett körívből és egyenesből automatikusan meghatározza az illesztett paramétereket. A Maxwell-Wagner relaxációt jellemző körív paraméterei közül a húr hossz és a karakterisztikus frekvencia korrelál a nyomással. (53. ábra).

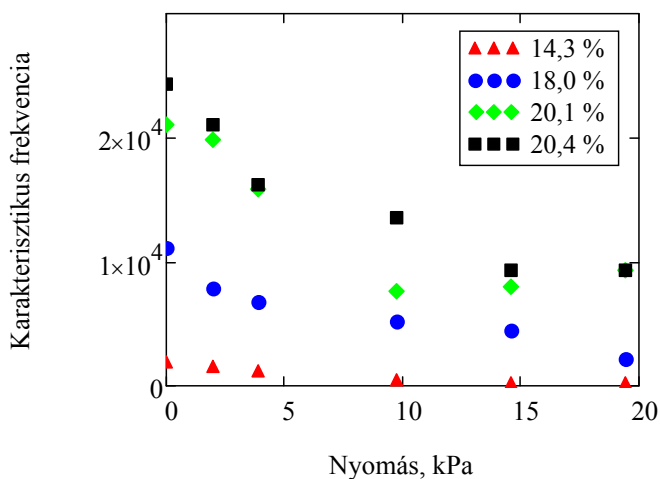




53. ábra A húrhossz nyomás függése, módosított hengerkondenzátor tesztcella.

Az ábra alapján megállapítható, hogy 14,3% - 20,4 % nedvességtartalmú kukoricák esetén a Maxwell-Wagner relaxációt jellemző húrhossz független a minta nedvességtartalmától, és a nyomás növekedésével szigorúan monotonon nő. A húrhossz és a nyomás kapcsolatának szorosságát jelző lineáris determinációs együttható, R értéke 0,954.

A karakterisztikus frekvencia a nyomás függvényében látható az 54. ábrán.



54. ábra Kukorica minták karakterisztikus frekvenciájának a nyomás függése módosított hengerkondenzátor esetén.

A karakterisztikus frekvencia a nyomás függvényében exponenciálisan csökken és a nedvességtartalom növekedésével nő.

## 5.5 MINTÁN BELÜLI EGYENLŐTLEN NEDVESSÉGELOSZLÁS

Ebben az alfejezetben a száraz-nedves kukorica keverékekkel végzett mérések eredményei láthatók.

### 5.5.1 Gabonaszemekben belüli egyenlőtlen nedvességekioszlás

A nedvesen szárítóba került kukorica a szárítóközeggel érintkezve először melegedni kezd, majd a létrejövő nedvesség gradiens hatására megindul a víz leadása. A száradás során a szemeken belül inhomogén nedvességzónák alakulnak ki (Beke 1997). A szárítási folyamat végén a gabona nedvességtartalmának meghatározása dielektromos elven működő nedvességmérőkkel a szemeken belüli egyenlőtlen nedvességekioszlás miatt pontatlanná válhat. A 7. táblázat a kísérleteimben szereplő minták (dielektromos elven működő, Burrows 700 nedvességmérővel mért és szárítószekrénnel meghatározott) nedvességtartalmait tartalmazza szárítás után közvetlenül és 24 órával később, a minta kiegyenlítődése után.

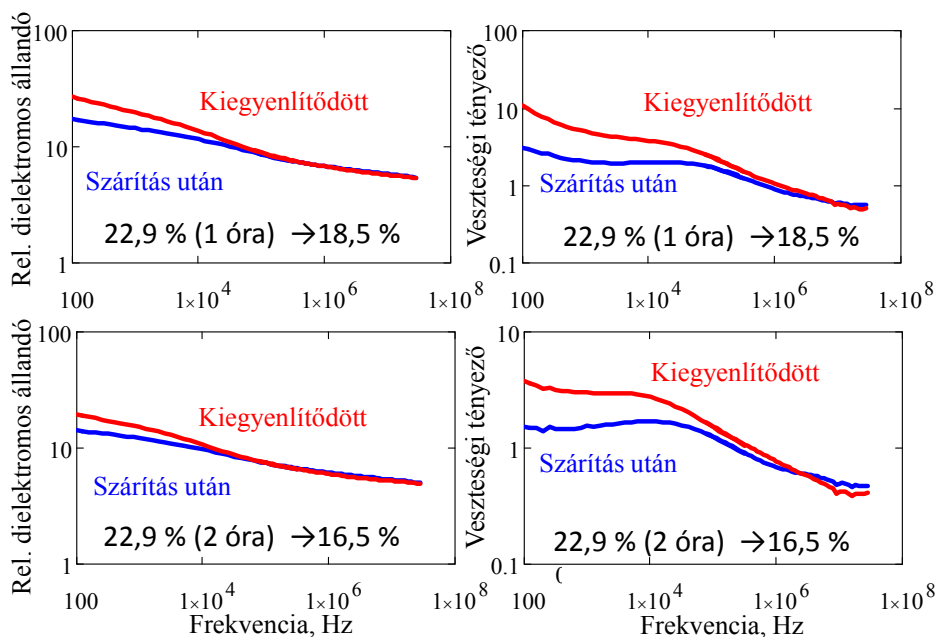
7. táblázat A méréseim során használt kukorica minták nedvességtartalmai a szárítás előtt, közvetlenül a szárítás után, majd 24 órával később, a minta kiegyenlítődése után Burrows 700 típusú dielektromos nedvességmérővel. Minta hőmérséklet 21 °C

A minta kiindulási nedvességtartalma szárítószekrénnel, %	Szárítási idő, h	(1) A minta nedvességtartalma szárítás után /Burrows 700 nedvességmérővel, %	(2) A minta nedvességtartalma kiegyenlítődése után/ Burrows 700 nedvességmérővel, %	Nedvességtartalom különbség Burrows 700 nedvességmérővel, % (2)-(1)
22,9	1	18,96	18,93	-0,03
22,9	2	17,23	16,70	-0,53
25,4	1	19,66	20,90	+1,24
25,4	2,3	16,40	15,50	-0,90
25,4	3	15,66	14,60	-1,06
26,2	2	14,66	13,93	-0,73
26,2	3	11,96	11,53	-0,43
26,2	4	11,20	11,03	-0,17
26,2	5	10,03	10,36	+0,33
34,0	2	21,26	23,56	+2,30
34,0	3	20,10	21,30	+1,20

A táblázat adataiból kitűnik, hogy míg a szárítószekrénnel meghatározott nedvességtartalmak kiegyenlítődése előtt és után egyenlők, addig a Burrows 700 nedvességmérővel mért értékek pozitív és negatív irányban is eltérnek. Ez ellentétben áll az irodalomban közöltekkel, melyek szerint a dielektromos elven működő nedvességmérők kisebbnek mérik a kiegyenlített minta nedvességtartalmát.

A következőkben arra kerestem választ, hogy a szemeken belüli egyenlőtlen nedvességekioszlásnak milyen hatása van a dielektromos jellemzőkre. Az 55. ábrán egy 22,9 %-os nedvességű kukorica minta relatív dielektromos görbéit ábrázoltam a frekvencia függvényében 1 és

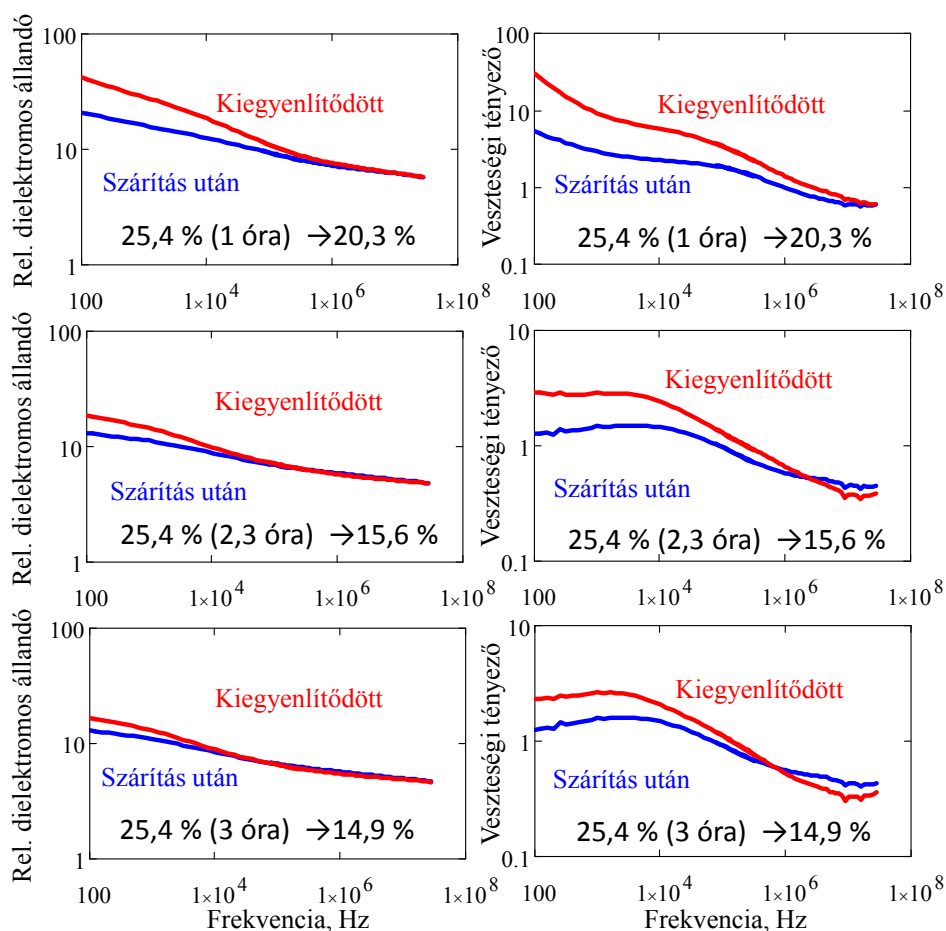
2 óra szárítás (és 22 °C-ra való lehűlése) után és 24 órával a szárítást követően, amikor a nedvességtartalom a szemeken belül már kiegyenlítődt.



55. ábra Egy 22,9 % nedvességtartalmú kukorica minta relatív dielektromos állandója és veszteségi tényezője (3 ismétlés átlaga) a frekvencia függvényében 1 óra és 2 óra szárítás után közvetlenül (kék) és kiegyenlítődtés után (piros)

Az ábrán látható, hogy az 1 és 2 óra szárítás után mért relatív dielektromos állandó a 0,1 MHz alatt kisebb, mint a kiegyenlítődtés után mért relatív dielektromos állandó, és ez a különbség a frekvencia csökkenésével fokozatosan nő. A 0,1 MHz feletti frekvenciatartományban a két relatív dielektromos állandó görbe közötti különbség fokozatosan eltűnik. A veszteségi tényező 1 és 2 órás szárítás után kisebb 1 MHz alatt, mint a 24 órával később, a kiegyenlítődtés után. Az 1 MHz feletti frekvenciatartományban a veszteségi tényező görbék metszik egymást, majd a frekvencia növekedésével a kiegyenlítődtött minta veszteségi tényezője fokozatosan kisebb lett, mint az inhomogén mintáé. A szárítási idő növekedésével, azaz a szárítással elért nedvességtartalom különbség növekedésével a veszteségi tényező görbék metszéspontjának a helye a kisebb frekvenciák felé tolódott.

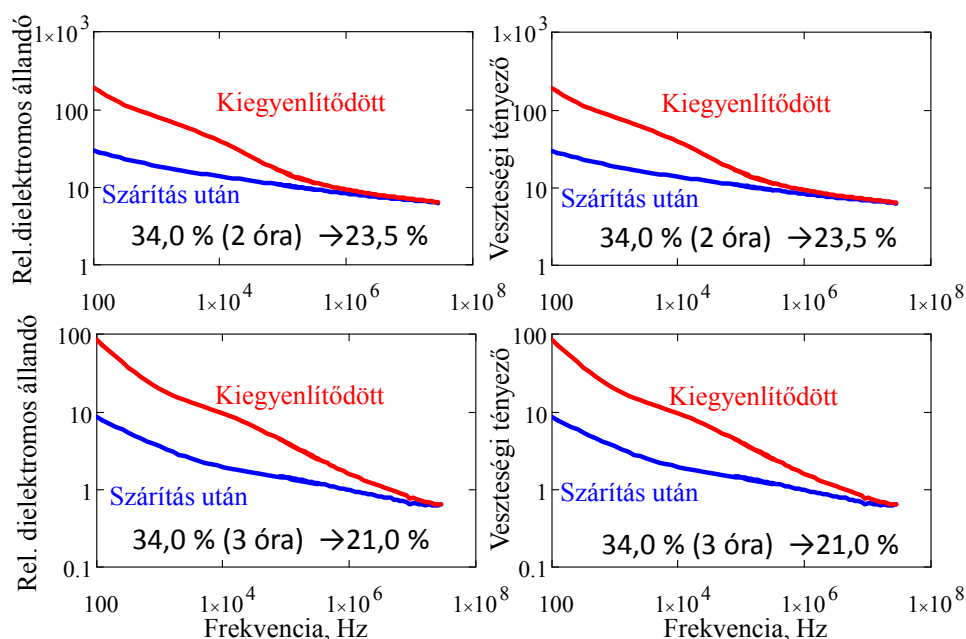
A kísérletet két nedvesebb mintán és hosszabb szárítási idővel megismételtem. Az 56. ábrán egy 25,4 %-os nedvességű kukorica dielektromos görbéi láthatók.



56. ábra Egy 25,4 % nedvességtartalmú kukorica minta relatív dielektromos állandója és veszteségi tényezője (3 ismétlés átlaga) a frekvencia függvényében 1 óra, 2,3 óra és 3 óra szárítás (kék) majd 24 órával később, a kiegyenlítődtés után (piros)

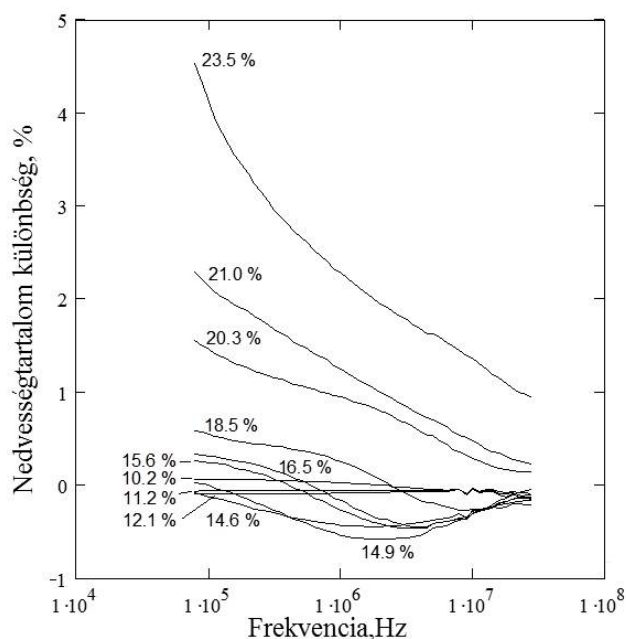
A 25,4 %-os nedvesséű kukorica minta kiegyenlítődtés utáni relatív dielektromos állandó értékei 1 óra szárítás után 1 MHz alatt, 2,3 óra szárítás után 100 kHz alatt, 3 óra szárítás után 10 kHz alatt nagyobbak, és e frekvenciák felett közel egyenlők a szárítás után mért relatív dielektromos állandó értékekkel. A két relatív dielektromos állandó görbe közötti eltérés a mérőfrekvencia csökkenésével nő, de a szárítási idő növekedésével csökken. Az inhomogén és a kiegyenlítődtött minta relatív dielektromos állandó értékei közötti különbség eltűnésének helye a szárítási idő növekedésével a kisebb frekvenciák felé tolódik. A kiegyenlítődtött minta veszteségi tényező értékei a frekvencia és a szárítási idő függvényében nagyobb, egyenlő vagy kisebb, mint a közvetlenül a szárítás után mért minta veszteségi tényezőjének az értékei. A két görbe metszéspontjának a helye a szárítási idő növekedésével a kisebb frekvenciák felé tolódik. A veszteségi tényező görbék metszéspontjához tartozó frekvenciánál kisebb frekvenciákon a kiegyenlítődtött minta veszteségi tényező értékei egyre nagyobbak a frekvencia csökkenésével, de a szárítási idő növekedésével a kiegyenlítődtött és az

inhomogén minták görbéi közötti különbség nagysága csökken. A veszteségi tényező görbék metszéspontjához tartozó frekvenciánál nagyobb frekvenciákon a kiegyenlített minta veszteségi tényező értékei kisebbek, mint a közvetlen szárítás után mért mintáé. A következőkben egy 34 % nedvességtartalmú kukorica mintán 10%-nál nagyobb nedvességtartalom csökkenést idéztem elő 2 és 3 óra szárítással. Az eredményeket az 57. ábrán ábrázoltam.



57. ábra Egy 34,0 % nedvességtartalmú kukorica relatív dielektromos állandója és veszteségi tényezője (3 ismételés átlaga) a frekvencia függvényében 2 óra és 3 óra szárítás után (kék) majd 24 órával később, a kiegyenlítés után (piros)

Az ábrából megállapítható, hogy a szárítás által okozott (az előbbi két mintánál nagyobb nedvességtartalom csökkenés hatására) a közvetlenül szárítás után mért és a kiegyenlített minták relatív dielektromos állandó és veszteségi tényező görbéi közötti különbség nagyobb lett. Az a frekvencia, ahol a relatív dielektromos állandó és veszteségi tényező görbék különbsége közel nulla lesz a szárítási idő növekedésével a nagyobb frekvenciák felé tolódott. A relatív dielektromos állandóból a (34) nedvesség kalibrációs összefüggéssel kiszámítottam a kukorica minták nedvességtartalmát. Ábrázoltam a három ismételés átlagából számított nedvességtartalom különbségeket (kiegyenlített mínusz szárítás után mért) a frekvencia függvényében (58. ábra):

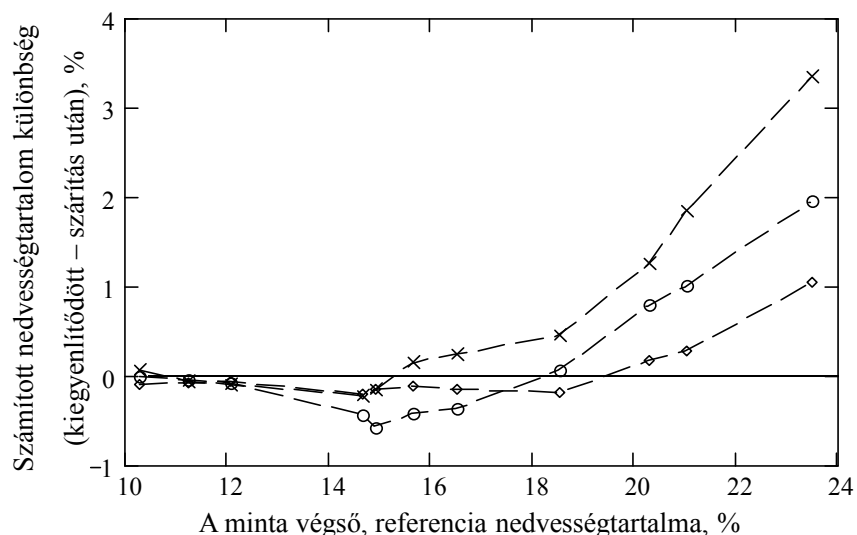


58. ábra A kiegyenlített és a szárítás után mért minták számított nedvességtartalmainak különbsége (3 ismétlés átlaga) frekvencia függvényében, az ipari mérési gyakorlat számára jelentős frekvenciatartományban. A görbéken a szárítás végén elért, szárítószekrénnel meghatározott nedvességtartalmak találhatók.

A pozitív különbség jelentése, hogy a számított nedvességtartalom értéke nagyobb a kiegyenlített mintáknál, mint közvetlenül szárítás után. A legnagyobb különbséget a 34 %-ról 23,5 %-ra leszártított kukorica mintánál figyelhetjük meg. A számított nedvességtartalom különbség a 100 kHz - 10 MHz közötti frekvenciákon maximum  $\Delta M_{\max} = +4,5 \%$  és 10 MHz felett  $\Delta M_{\max} = +1 \%$ . A 26,2 %-ról 3 és 4 óra alatt 12,1 % és 10,2 % nedvességtartalomra leszártított mintáknál a kiegyenlített és a szárítás után közvetlenül mért minták számított nedvességtartalom különbsége a teljes frekvenciatartományban elhanyagolható. A 14,6-18,5 % nedvességtartalomra szárított mintáknál érdekes jelenséget figyelhetünk meg. A szárítás során elért végső nedvességtartalom csökkenésével a számított nedvességtartalom különbség egyre negatívabb lesz. A minimum elérése után (100 MHz körül) a frekvencia növekedésével értéke közelít a nullához.

A szakirodalomban az inhomogén nedvességeloszlás hatását a mért nedvességtartalom értékekre bár pozitív előjelűnek tüntetik fel, azonban eredményeim szerint a dielektromos nedvességmérők által használt 500 kHz-10 MHz közötti frekvenciatartományban egyes esetekben az eltérés negatív is lehet. Így a szárítás után már lehűlt, de még inhomogén nedvességeloszlású minta nedvességtartalmát a dielektromos nedvességmérők a ténylegesnél nagyobbak mérhetik.

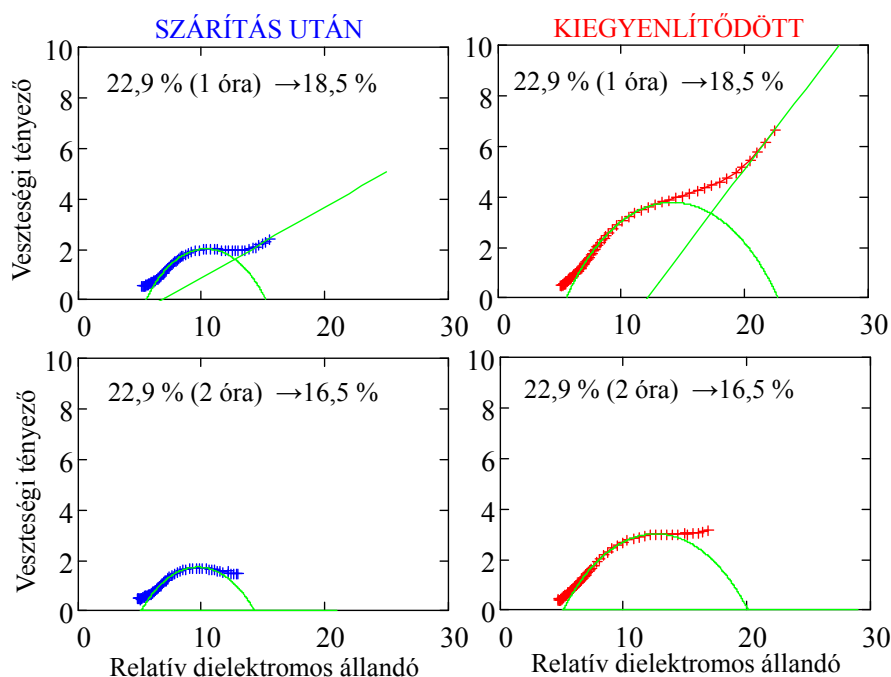
Az 59. ábrán a számított nedvességtartalom különbségeket ábrázoltam a minta végső, szárítószekrénnel meghatározott nedvességtartalmának függvényében 200 kHz, 2 MHz és 20 MHz frekvenciákon:



59. ábra Számított nedvességtartalom különbségek (kiegyenlített mínusz kiegyenlített) a minta végső, szárítószekrénnel meghatározott nedvességtartalmának függvényében 200 kHz (X), 2 MHz (○) és 20 MHz (◇) mérőfrekvencián.

Az ábrán látható, hogy a gabonaszemekben belüli inhomogén nedvességeloszlás hatása a számított nedvességtartalom különbségre 20 MHz-en a legkisebb. A tárolási nedvességtartalom 14-16 %-os tartományában 2 MHz-en az eltérés negatív és értéke  $\approx 0,5$  %. A számított nedvességtartalom különbség nagysága függ a mérőfrekvenciától és a szárítással elért végső nedvességtartalomtól.

A továbbiakban arra kerestem választ, hogy kimutatható-e szignifikáns különbség a már kiegyenlített és az inhomogén nedvesség eloszlású minta között. A relatív dielektromos állandót és a veszteségi tényezőt a frekvencia függvényében ábrázolva e kérdésre nem lehet egyértelműen válaszolni. A két állapot közötti különbség láthatóvá tétele érdekében az 55-57. ábrákon megjelenített adatokat Argand diagramokon ábrázoltam. A 60. ábrán a 22,9 % nedvességtartalmú kukorica minta Argand ábrái láthatók 1 óra és 2 óra szárítás után, kiegyenlített és kiegyenlített állapotban.

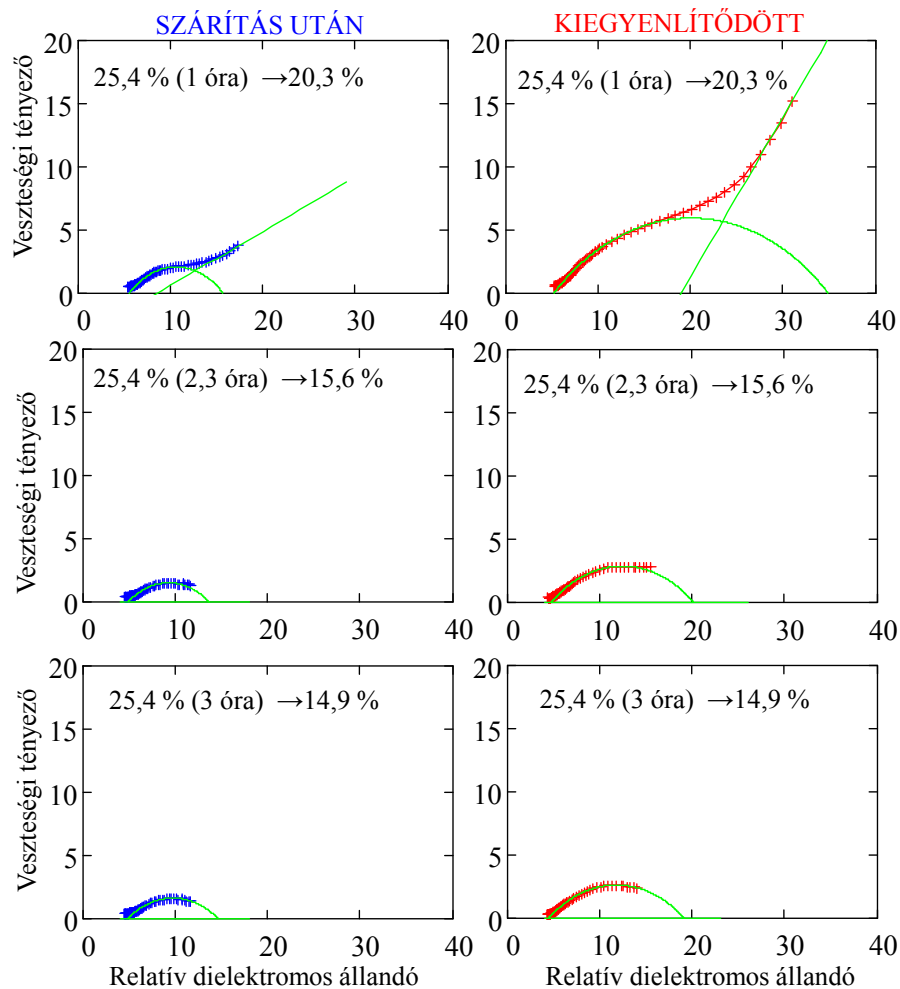


60. ábra Egy 22,9 % nedvességtartalmú kukorica Argand görbéi (3 ismételtes átlaga) 1 óra és 2 óra szárítás és kiegyenlítődés után. Jelölések: kék – szárítás után, piros – kiegyenlítődött, zöld – Mathcad 2010 programmal illesztett körív és egyenes

Az adott szárítási időnél a minta szárítás utáni és kiegyenlítődött állapotához tartozó Argand görbék alakja nagyon hasonló. Egy óra szárítás után a minta nedvességtartalma 18,5 % lett, és ezen a nedvességtartalmon a Maxwell-Wagner relaxációt jellemző körív és az elektródpolarizációt jelző egyenes még látható a görbén. A kiegyenlítődött minta illesztett egyenesének meredeksége nőtt. Az Argand görbéket jellemző paraméterek közül a húrhossz (az illesztett körív és az x-tengely által meghatározott húr nagysága) megnövekedése a szembevetendő. Két óra szárítás után a minta görbéire már nem tudtam egyenest illeszteni, az elektródpolarizáció helyett a Maxwell-Wagner relaxáció dominálja a görbét. Hasonlóan az 1 óra szárításnál tapasztaltakkal a húrhossz közel kétszeresére nő.

A 61. ábrán a 25,4 % nedvességtartalmú kukorica minta Argand görbéi láthatók 1 óra, 2,3 óra és 3 óra szárítás után, kiegyenlítetlen és kiegyenlítődött állapotban.

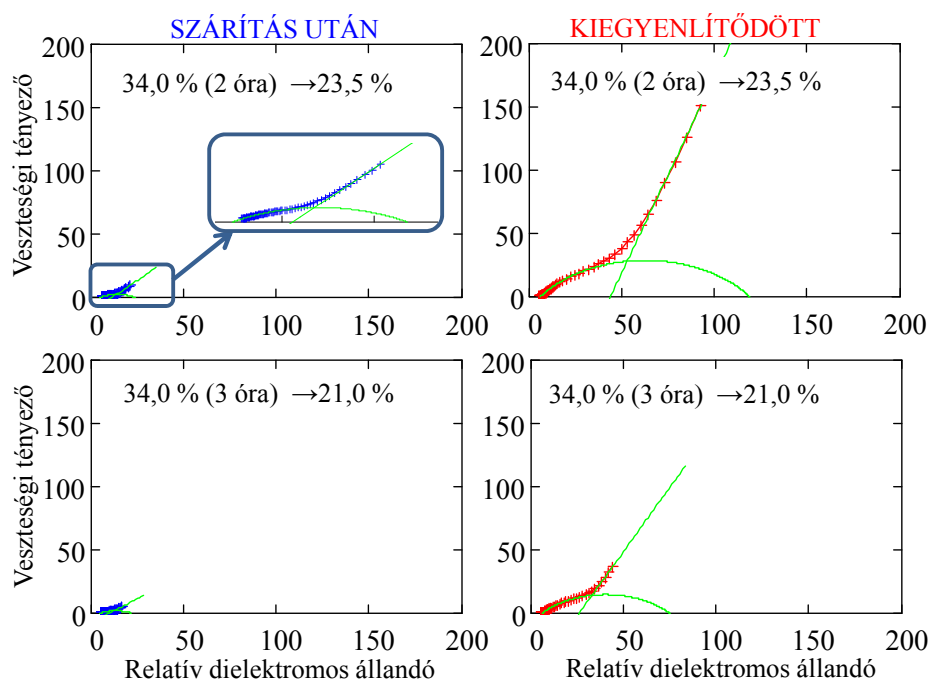




61. ábra Egy 25,4 % nedvességtartalmú kukorica minta Argand görbéi (3 ismétlés átlaga) 1 óra, 2,3 óra és 3 óra szárítás és kiegyenlítődés után. Jelölések: kék – szárítás után, piros – kiegyenlítődött, zöld – Mathcad 2010 programmal illesztett körív és egyenes

Az ábrán megfigyelhető, hogy a nedvességtartalomra jellemző Argand görbe alakja nem változott, de nagysága közel kétszeresére nőtt. Bár a szárítási idő növekedésével egyre nagyobb nedvességtartalom különbséget hoztam létre, ez nem okozta a szárítás utáni és a kiegyenlítődött minta Argand paramétereinek közötti különbség növekedését.

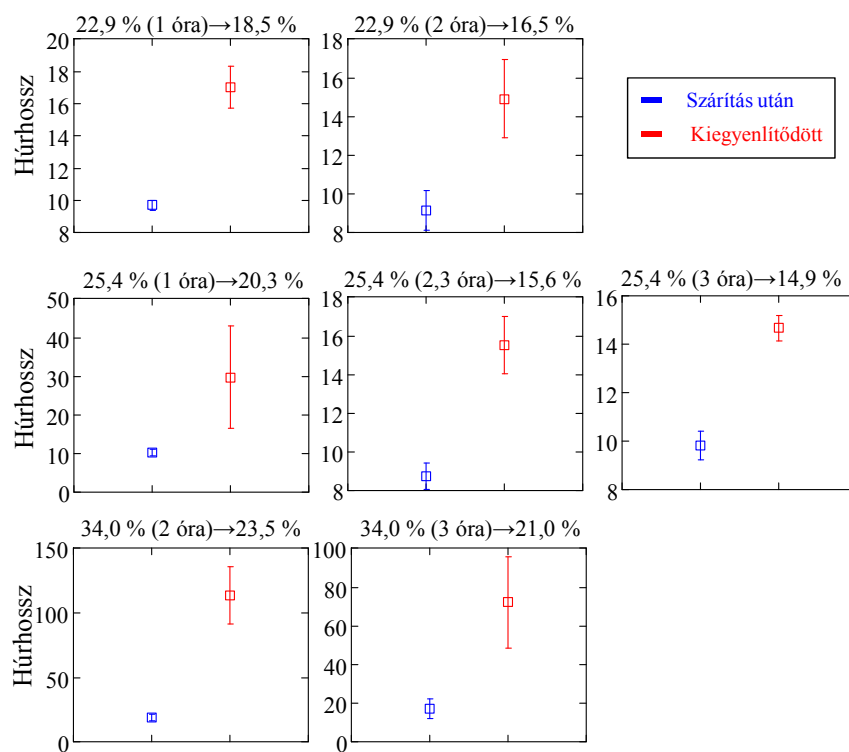
A 34,0 % nedvességű kukorica minta Argand ábráin is megfigyelhető az előző mintáknál tapasztalt jelenség, azaz az adott szárítási időhöz tartozó szárítás utáni és kiegyenlítődött minták Argand görbéinek alakja nem, de nagysága változott (62. ábra).



62. ábra Egy 34,0 % nedvességtartalmú kukorica minta Argand görbái (3 ismétlés átlaga) 1 óra, 2,3 óra és 3 óra szárítás és kiegyenlítődés után. Jelölések: kék – szárítás után , piros – kiegyenlítődött, zöld – Mathcad 2010 programmal illesztett körív és egyenes. A kék négyzetekben az eredeti görbe és annak nagyítása látható.

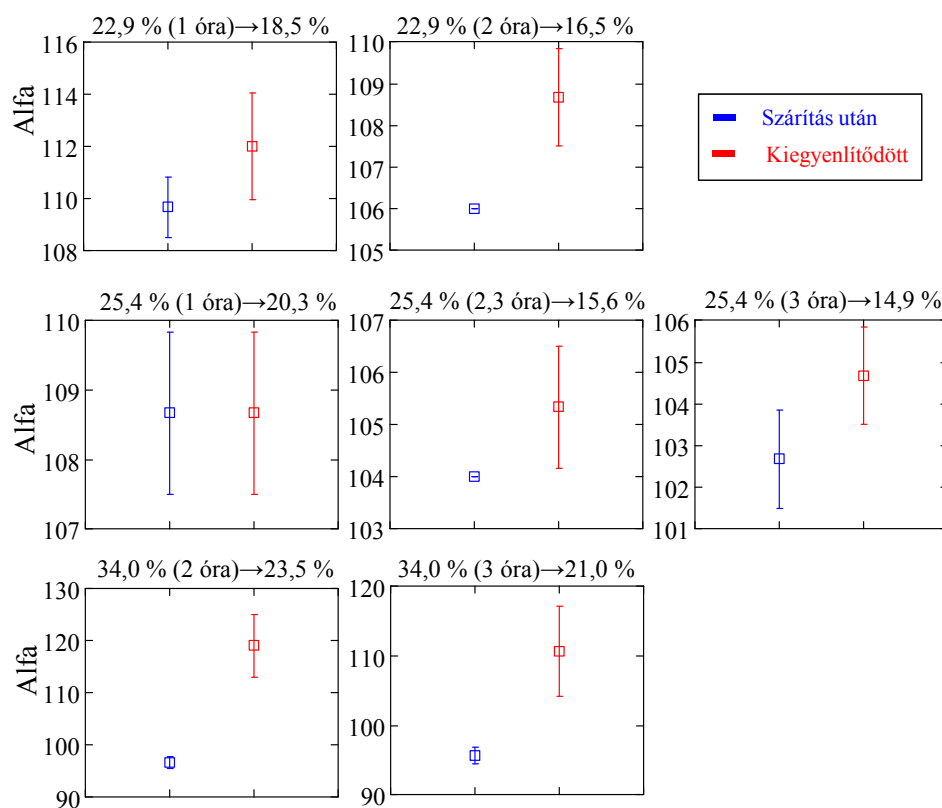
A 60-62. ábrákból megállapítható, hogy a szárítás utáni és a kiegyenlítődött minta húr hossza közötti különbség a szárítási idő (és a kiindulási és a szárított nedvességtartalmak közötti különbség) növekedésével csökken.

A dielektromos görbéken 100 MHz alatt megfigyelhető vezetési hatások közül az elektródpolarizáció nincs, vagy csak kis mértékben van jelen a száraz minták esetén. A Maxwell-Wagner relaxáció azonban száraz és nedves minta esetén egyaránt jelentkezik, így érdeklődésem középpontjában a Maxwell-Wagner relaxációt jellemző, illesztett körívből meghatározott paraméterek álltak, mint a húr hossza, a körív központi szöge és a karakterisztikus frekvencia. Feltételezésem szerint, e paraméterek segítségével kimutatható a szignifikáns különbség a szárítás utáni és a kiegyenlítődött kukorica minták dielektromos jellemzői között. A 63. ábra a 22,9 %, a 25,4 % és a 34,0 % nedvességtartalmú kukorica minták húr hosszainak 3 ismétlésből származó átlaga és 95 %-os konfidencia intervalluma látható különböző szárítási idő esetén.



63. ábra A húrhossz átlaga (3 ismétlés) és 95 %-os konfidencia intervalluma 22,9 %, a 25,4 % és a 34,0 % nedvességtartalmú kukorica minta és különböző szárítási idő esetén.

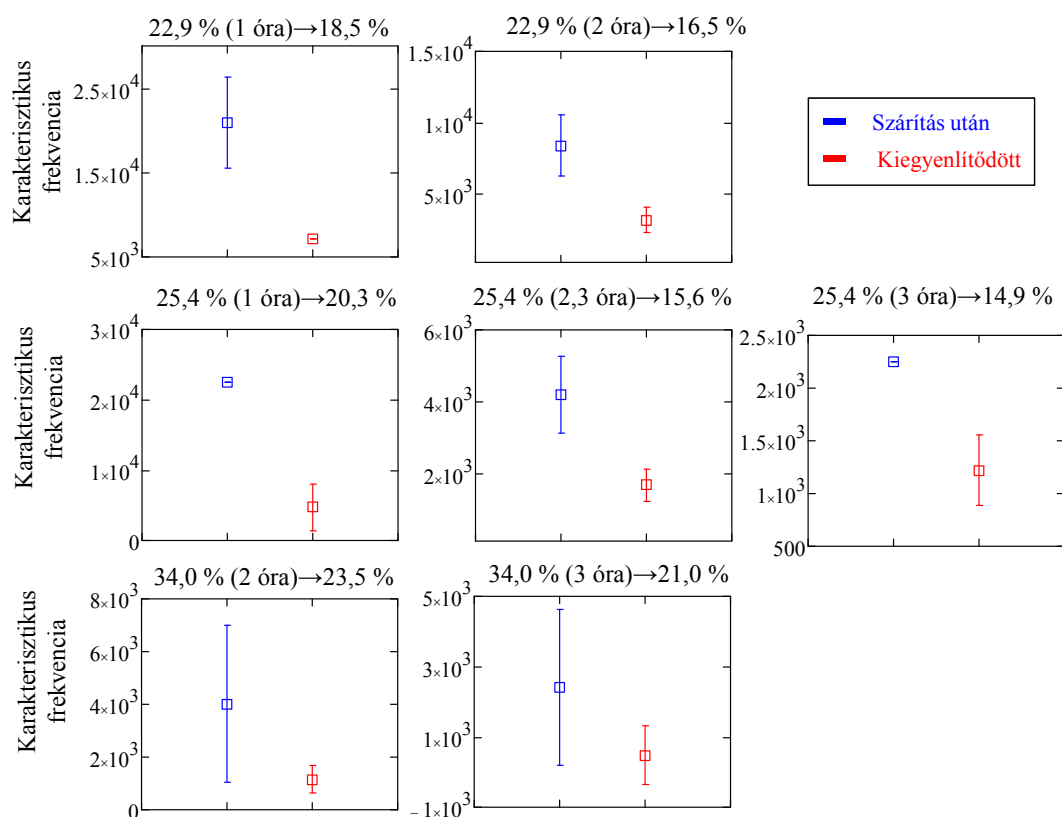
Az ábra alapján megállapítható, hogy 22,9 % - 34,0 % nedvességtartalmú kukorica szárítás utáni és a kiegyenlítődt minták húrhosszai között szignifikáns különbség van. A kiegyenlítődt minták húrhossz átlaga nagyobb és konfidencia intervalluma szélesebb volt (vagy közel egyenlő: a 25,4 % minta 3 óra szárítása után), mint szárítás után az inhomogén nedvességeloszlású mintáké. Az illesztett körív központi szögének vizsgálata a 64 ábrán látható.



64. ábra Az illesztett körív központi szögének ( $\alpha$ ) átlaga (3 ismételés) és 95 %-os konfidencia intervalluma 22,9 %, a 25,4 % és a 34,0 % nedvességtartalmú kukorica minta és különböző szárítási idő esetén.

A 34,0 %-os nedvességű minta 2 és 3 óra szárítása után szignifikáns különbség mutatható ki a szárítás utáni és a kiegyenlítődőtt minták  $\alpha$  értékei között. Szignifikáns a különbség a 22,9 %-os minta 2 órás és a 25,4 % nedvességű minta 2,3 óra szárítása után, de a többi esetben a különbség nem szignifikáns.

A 65. ábra tartalmazza a karakterisztikus frekvencia értékeinek elemzését, amely a Maxwell-Wagner csúcs helyét adja meg.



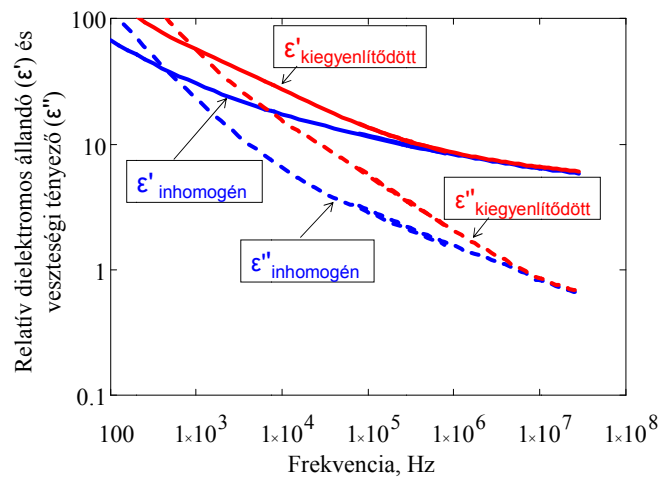
65. ábra A karakterisztikus frekvencia átlaga (3 ismételés) és 95 %-os konfidencia intervalluma 22,9 %, a 25,4 % és a 34,0 % nedvességtartalmú kukorica minta és különböző szárítási idő esetén.

A karakterisztikus frekvencia minden esetben csökkent a kiegyenlítődtés után. Szignifikáns különbséget azonban csak a 22,9 %-os és a 25,4 %-os mintáknál figyelhetünk meg. Ez az eredeti Argand görbéket megnézve nem is meglepő, hiszen a nagyobb nedvességtartalmaknál az elektród polarizáció dominálja a dielektromos görbéket és a körív illesztése egyre bizonytalanabbá válik.

A korábbiakból levonható az a következtetés, hogy az illesztett paraméterek közül a húr hossz alkalmas az inhomogén nedvességeloszlású és a kiegyenlítődt minták szétválasztására.

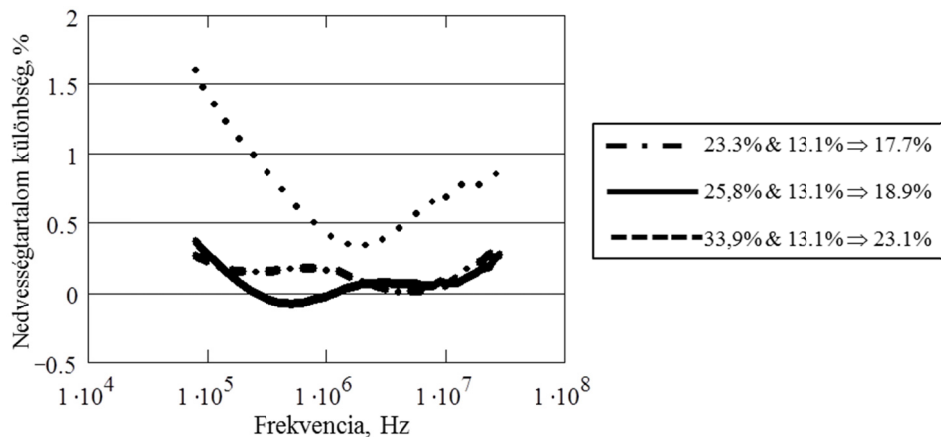
## 5.5.2 Száraz-nedves kukorica keverékek vizsgálata

A 66. ábrán ábrázoltuk a  $w = 33,9\%$  nedves, és  $w = 13,1\%$  száraz kukoricaminták 50-50 %-os keverékéből előállított három különböző tesztadag háromszori ismételésének átlag relatív dielektromos állandóját és veszteségi tényezőjét a frekvencia függvényében, közvetlenül az összekeverés, és a kiegyenlítődtés után.



66. ábra Egy 23,1 % keverék minta relatív dielektromos állandója és veszteségi tényezője a frekvencia függvényében kiegyenlítődés előtt ( $\epsilon'_{ra}$ ,  $\epsilon''_{ra}$ ) és kiegyenlítődve ( $\epsilon'_{rb}$ ,  $\epsilon''_{rb}$ )

A minták szabványmódszerrel meghatározott nedvességtartalma kiegyenlítődés előtt és után egyaránt 23,1 % volt, ezért azt vártuk, hogy a dielektromos spektrumokban sem lesznek szignifikáns különbségek. A dielektromos spektrumokban azonban 10 MHz alatti frekvenciatartományban szignifikáns eltérések tapasztalhatók. A kiegyenlítődött minta relatív dielektromos állandója és veszteségi tényezője alacsony frekvencián nagyobb, a magasabb frekvenciatartományban kisebb, vagy egyenlő a kiegyenlített mintához viszonyítva. Hasonló tendenciákat tapasztaltunk mind a nagyobb mind, pedig a kisebb nedvességtartalmú keverék mintáknál is. A dielektromos jellemzőkből számított nedvességtartalom különbségeket (kiegyenlítődés utáni nedvességtartalom mínusz kiegyenlítődés előtti nedvességtartalom) ábrázoltuk a frekvencia függvényében a 67. ábrán.

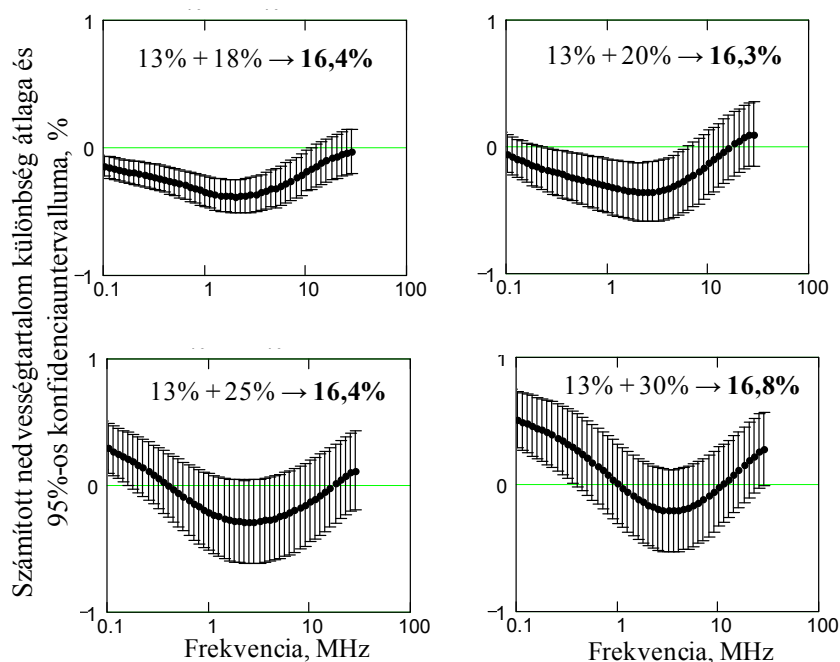


67. ábra A számított nedvességtartalom különbség (kiegyenlítődött mínusz a kiegyenlítettlen) különböző 50-50 % arányú kukorica keverékek esetén.

Mindhárom görbén megfigyelhető, hogy az eltérés nagyságát és előjelét a mérőfrekvencia és az eredeti minták közötti nedvességtartalom különbség határozza meg.

Felmerült a kérdés, hogy hasonló tendenciákat tapasztalhatunk-e, ha különböző nedvességtartalmú kukorica mintákat, szárazzal olyan arányban keverünk, hogy a keverék nedvességtartalma egy adott értékre legyen beállítva, vagy ha a keverékeket meghatározott arány szerint állítjuk elő.

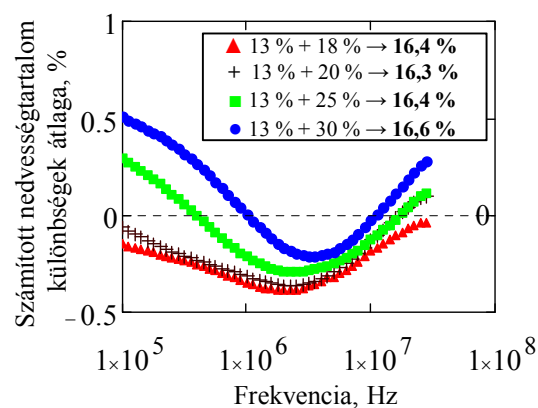
A 68. ábra a különböző arányú keverékek eredményeit mutatja, amelyek a 16,5 %-os célnedvességre lettek keverve:



68. ábra Célnedvességtartalomra ( $\approx 16,5\%$  az ábrán félkövér) beállított kukorica keverékek számított nedvességtartalom különbség (kiegyenlített mínusz kiegyenlítettlen) átlaga és 95 %-os konfidencia intervalluma a frekvencia függvényében.

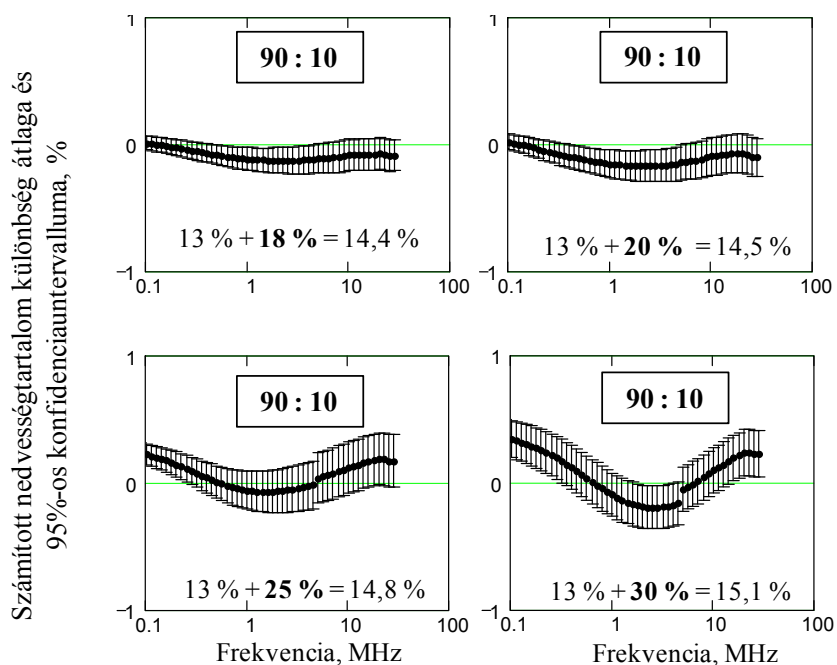
Megfigyelhető, hogy egyre nedvesebb kukoricát adva a keverékhez a számított nedvességtartalom különbségek pozitív irányba eltolódnak. A konfidencia intervallum szélesebbé válik a teljes frekvenciatartományban a keverék nedves alkotójának nedvességtartalmának növekedésével. Természetesen, a nedves alkotó aránya a nedvességtartalom növekedésével csökkent, azaz ugyanakkora célnedvesség eléréséhez kevesebb nedves kukoricára volt szükség.

A 69. ábra együtt mutatja a 68. ábrán lévő értékek átlagát.



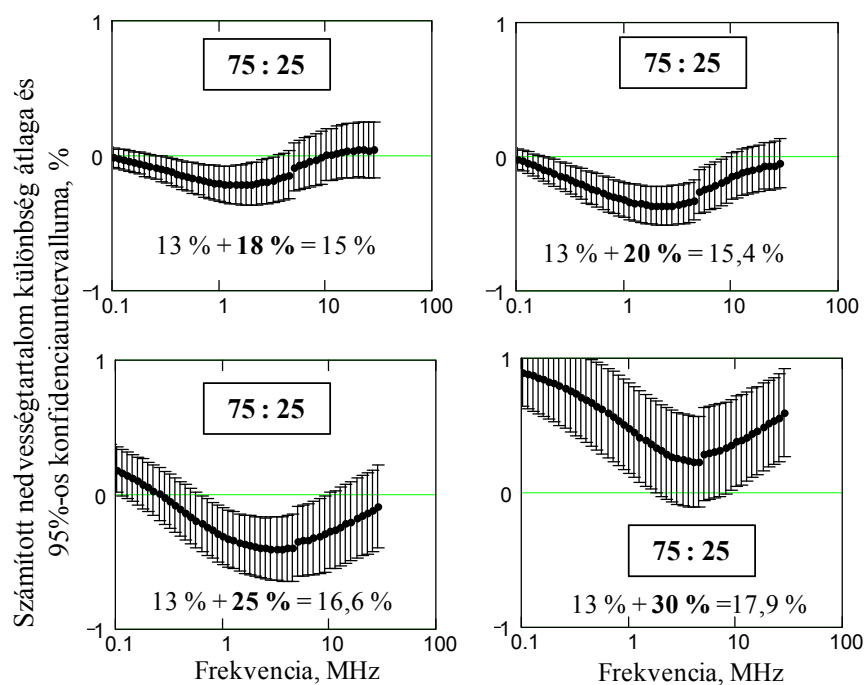
69. ábra A 68. ábrán látható célnedvességtartalomra ( $\approx 16,5\%$ ) beállított kukorica keverékek számított nedvességtartalom különbség (kiegyenlített mínusz kiegyenlítetlen) átlaga a frekvencia függvényében.

Annak ellenére, hogy mind a négy minta végső nedvessége közel azonos, a becült nedvesség különbség a kiegyenlítődött és kevert mintákra egy határozott módon változott attól függően, hogy milyen nedvességtartalmú mintát használtunk nedves komponensnek. A magasabb nedvességtartalmú nedves komponensekre a különbség az egész tartományon nőtt, de a görbék jellegzetes alakja megmaradt. A 70 - 72. ábra a 90:10, 75:25 és az 50:50 arányú keverékek eredményeit mutatja be:

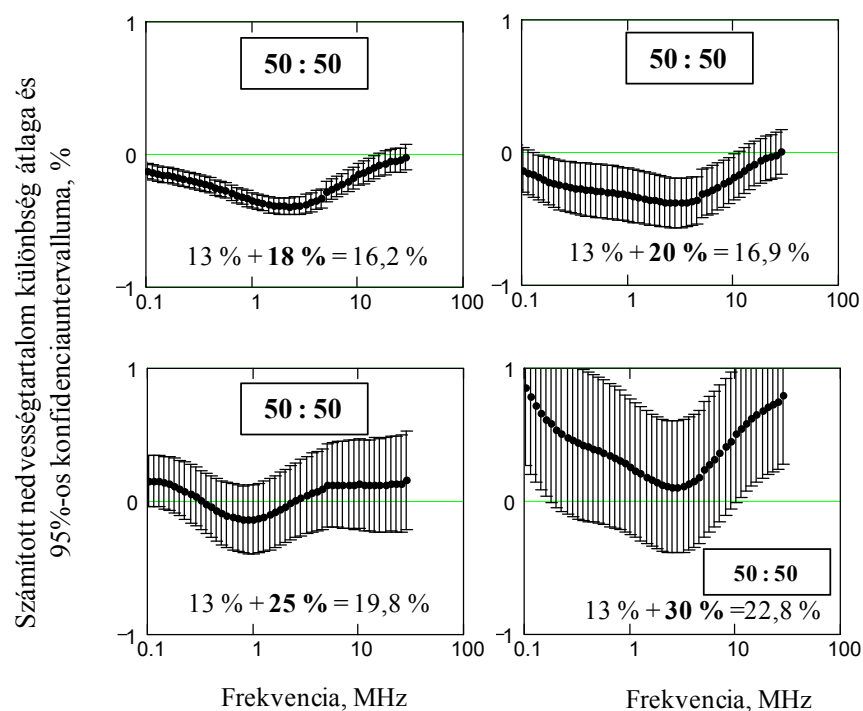


70. ábra A 90:10 arányú száraz-nedves kukorica keverékek számított nedvességtartalom különbség (kiegyenlített mínusz kiegyenlítetlen) átlaga és 95 %-os konfidencia intervalluma a frekvencia függvényében.





71. ábra A 75:25 arányú száraz-nedves kukorica keverékek számított nedvességtartalom különbség (kiegyenlített mínusz kiegyenlítetlen) átlaga és 95 %-os konfidencia intervalluma a frekvencia függvényében.



72. ábra 50:50 arányú száraz-nedves kukorica keverékek számított nedvességtartalom különbség (kiegyenlített mínusz kiegyenlítetlen) átlaga és 95 %-os konfidencia intervalluma a frekvencia függvényében.

Az ábrák hasonló tendenciákat mutatnak. Az 1-10 MHz frekvenciatartományban kisebb a számított nedvességtartalom különbség átlag (pontosabban az egyes mintákra levetítve, kevésbé pozitív vagy jobban negatív lett), mint a kisebb és nagyobb frekvenciákon. Ez a hatás kevésbé volt hangsúlyos azoknál a mintáknál, amelyek végső nedvességtartalma 15 % alatt van. Megállapíthatjuk, hogy függetlenül a keverési aránytól a számított nedvességtartalom különbség átlagának konfidencia intervalluma növekvő tendenciát mutatott keverék nedves alkotórészének nedvességtartalmának növekedésével. A különbségek statisztikailag szignifikánsnak mutatkoztak (a konfidencia intervallumok nem tartalmazzák a nullát) a frekvenciatartomány legnagyobb részében, azokra a gabonákra, amelyek 18 és 20 %-os kukoricát tartalmaztak, de ugyanez nem volt igaz a 25 és 30 %-os nedves kukoricával készült keverékekre. A ábrákon látható görbék hasonló alakja azt sugallta, hogy megfelelő eljárással elkülöníthető a kiegyenlített kukorica minta a már kiegyenlítődött halmaztól. Módszert dolgoztam ki a kiegyenlített és a már kiegyenlítődött minták szétválasztására.

A minták elkülönítésére végzett diszkriminancia analízis eredménye a (38) másodfokú függvény lett:

$$M_{28\text{MHz}} - M_{5\text{MHz}} = -0,01 \cdot (M_{28\text{MHz}} - 14)^2 - 0,18 \quad (38)$$

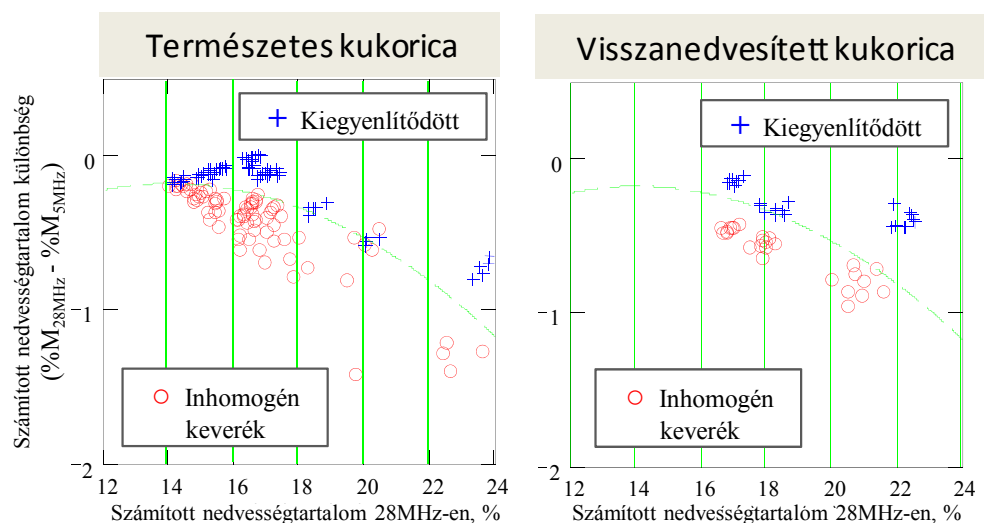
ahol  $M_{5\text{MHz}}$  a számított nedvességtartalom 5 MHz-en és  $M_{28\text{MHz}}$  a számított nedvességtartalom 28 MHz-en.

A minta kiegyenlítődött ha:

$$M_{28\text{ MHz}} - M_{5\text{ MHz}} \geq -0,01 \cdot (M_{28\text{ MHz}} - 14)^2 - 0,18 \quad (39)$$

azaz megmérve a kukorica mintát 28 MHz és 5 MHz-en, és az így kapott nedvességtartalom értékeket kivonva egymásból, ha az így kapott eredmény nagyobb vagy egyenlő, mint  $M_{28\text{ MHz}} - M_{5\text{ MHz}}$ , akkor a minta már kiegyenlítődött, ha kisebb akkor inhomogén nedvesség eloszlású mintának volt besorolva.

A vizsgálataimban szereplő csak természetes és visszanedvesített, nedves alkotórészű kukoricából készült keverékeken alkalmazott módszer eredménye 73. ábrán látható:



73. ábra Számított nedvességtartalom különbségek 28 MHz-en és 5 MHz-en inhomogén és homogén nedvesség eloszlású mintákra. A szaggatott vonal a másodfokú határt ábrázolja.

A 8. táblázat Az osztályozás sikeressége százalékosan a kiegyenlítettlen és a már kiegyenlített száraz-nedves kukorica keverékekre táblázat az osztályozás sikerességét mutatja meg a nem kiegyenlített minták detektálására. A módszer több mint 92 %-os hatékonysággal azonosította a kevert és a kiegyenlítődt mintákat mind a mesterségesen nedvesített, mind pedig és a természetesen nedves mintákon.

8. táblázat Az osztályozás sikeressége százalékosan a kiegyenlítettlen és a már kiegyenlített száraz-nedves kukorica keverékekre

	Visszanedvesített		Természetes	
	Keverék	Homogén	Inhomogén	Homogén
<b>Keveréknek ítélt</b>	92,5	6,2	96,2	7,7
<b>Homogénnek ítélt</b>	7,5	93,8	3,8	92,3

### *Inhomogén nedvességeloszlás fejezet összefoglalása:*

Egyenetlen nedvességeloszlás létrejöhet a különböző nedvességtartalmú magok között vagy a gyors szárítás hatására, a magokon belül. A hiba nagysága függ az mérőfrekvencia nagyságától, a szárítással elért nedvességkülönbség nagyságától és a keverékekben szereplő maghalmazok közötti nedvességtartalom különbségtől. Mindezen jelenségek magyarázatát a dielektromos spektrumokban jelentkező jellegzetes hatások összegződése okozza. A 28 MHz alatti frekvenciatartományban 3 fő hatás jelentkezik.

Az első hatás az árnyékolási hatás. Ha gabonaszemeket kis kondenzátoroknak tekintve e jelenség könnyen megérthető. A száraz szemeknek kisebb a kapacitása, mint a nedveseké. Ha a

száraz és a nedves gabonaszemeket sorba kötött kondenzátoroknak vesszük, akkor ez esetben az eredő kapacitás kisebb, mint a legkisebb kapacitás, azaz a száraz gabonaszemek jelenléte az eredő kapacitást jelentősen csökkentik. A szárított gabona esetében a magokon belüli nedvesség különbség okozza ezt a jelenséget. Ez a magyarázata annak, hogy a kiegyenlített minta esetén a mért relatív dielektromos állandó nagyobb, mint a még kiegyenlítetlen mintáé.

A második hatás az elektród polarizációs hatás. Az elektródpolarizáció főleg az alacsony frekvenciákon jelentkezik, de nagy nedvesség tartalmú gabona esetén jelentős hatása van a néhány megahertzes tartományban is. Emiatt láthatjuk, hogy a nagyobb nedvességtartalmú mintáknál a Maxwell-Wagner relaxációra utaló körív szinte eltűnik, és a görbén az elektródpolarizáció válik dominánssá, amit az illesztett egyenes nagymértékű megnövekedése jelzett.

A Maxwell-Wagner relaxáció a harmadik hatás. A relaxáció oka a mintán belüli nem egyenletes vezetőképesség. A dielektromos veszteségi csúcs nagysága és az ehhez tartozó frekvencia függ a magasabb vezetőképességű tartományok körüli réteg kapacitásától és a tartomány vezetőképességétől. A tartományok vezetőképességének csökkenésével az előbb említett csúcs az alacsonyabb frekvenciák felé tolódik. A nedves gabonaszemek a mintán belül és a nedvesebb belsővel rendelkező magok (keverékeknél) is tapasztalható a Maxwell-Wagner relaxáció. A nedvesség kiegyenlítése csökkenti azon tartományok vezetőképességét, amelyek a relaxációt okozták és ezért látható alacsonyabb frekvencián a Maxwell-Wagner csúcs. Ha a Maxwell-Wagner csúcs frekvenciája a kiegyenlítetlen gabonában alacsonyabb, mint a mérés frekvenciája a kiegyenlítés a mért adatok csökkenését okozza. Ha a frekvencia a mérési tartomány felett van, akkor a növekedésüket okozza.

Összefoglalva: a három hatás közül kettő, az árnyékolási hatás és az elektród polarizáció a relatív dielektromos állandó növekedését okozza, míg egy, a Maxwell-Wagner relaxáció az emelkedést vagy a csökkenést okozhatja, függően a kiegyenlítetlen mintától és a mérési frekvenciától.

## 5.6 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

### A Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció hatékonysága 100 MHz alatt

1. Megmutattam, hogy a Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció a különböző betöltési módok által okozott sűrűségkülönbségek hatását
  - a. 100 kHz és 28 MHz közötti frekvencia tartományban tesztcellától függetlenül eredményesen korrigálta 11,2 % - 31,8 % nedvességtartalmú kukorica mintákon,
  - b. 100 kHz alatti frekvenciákon tesztcellától és nedvességtartalomtól függ, hogy milyen mértékben csökkenti a hiba nagyságát.
2. A hengerkondenzátor tesztcellával végzett méréseink alapján megállapítottam, hogy ha a tesztcella középső elektródja rövidebb, mint a külső elektródja, akkor a középső elektród mellett és felett kialakuló különböző mintasűrűség miatt a Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció eredményessége jelentősen romlik. A gabona nedvességmérésében a sűrűségkülönbségek okozta hibák kiküszöböléséhez elengedhetetlen és alapvető a minta pontos sűrűségének ismerete a tesztcella elektromosan aktív részében.
3. Bizonyítottam, hogy a terhelés hatására szignifikáns különbség jött létre a dielektromos jellemzőkben 100 Hz-28 MHz közötti frekvencia tartományban. Megmutattam, hogy a dielektromos jellemzők megváltozásának oka nem a nyomás hatására létrejött sűrűségkülönbség, hanem a mintában erőteljesebbé vált vezetési hatások. Az ezen hatások által a dielektromos gabona nedvességmérésben okozott hibák kiküszöbölésére a Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció nem alkalmas.

### Dielektromos jellemzők Argand görbéje

4. Megállapítottam, hogy a gabonák Argand görbéi tesztcellától függetlenül leírhatók a Maxwell-Wagner relaxációt jellemző körív és az elektród polarizációt jellemző egyenes kombinációjával 100 kHz-28 MHz közötti frekvencia tartományban az alábbiak szerint:
  - a. 14 %-os nedvességtartalom alatt kukorica és szója minta esetén csak körívvel,
  - b. kukorica esetén 14 % - 35,2 %, szója esetén 14 %- 22,9 % nedvességtartalom között egy körívvel és egy egyenessel.

## A nyomás hatása

5. Megállapítottam, hogy terhelés hatására gabona fajtól, tesztcellától és nedvességtartalomtól függetlenül a Maxwell-Wagner relaxációra és az elektród polarizációra jellemző frekvencia tartományok eltolódnak. A nyomás és a minta nedvességtartalmának növekedésével az elektród polarizáció dominánssá válik a dielektromos görbéken.
6. Megállapítottam, hogy tesztcellától függetlenül, a nyomás hatására a 11,2 %-36,9 % nedvességtartalmú kukorica minták Argand ábráinak jellemző képe nem változik, de az illesztett kör átmérője és az illesztett egyenes szakasz hossza a terhelés nagyságának növekedésével nő.
7. Módosított hengerkondenzátor tesztcella esetén a nedvességtartalomtól független, lineáris összefüggést találtam a 14,3 % - 20,4 % nedvességtartalom közötti kukorica minták Argand görbéire illesztett körívből meghatározott húr hossz és a nyomás között. A köztük lévő függvénykapcsolat:

$$\text{Húr hossz} = 1,114 \cdot \text{Nyomás} + 12,633$$

a determinációs együttható 0,954.

## Száraz-nedves kukorica keverékek

8. A száraz-nedves kukorica keverékek kiegyenlítődés utáni és kiegyenlítődés előtti számított nedvességtartalom különbsége függ a keverék nedves komponensének nedvességtartalmától és a mérési frekvenciától.
9. Módszert dolgoztam ki száraz-nedves kukorica keverék inhomogén és kiegyenlített állapotának megkülönböztetésére. Eszerint a száraz-nedves kukorica keverék 5MHz és 28MHz frekvencián mért relatív dielektromos állandójának ismeretében a kiegyenlített keverék megkülönböztethető az inhomogéntól 92%-os hatékonysággal a következő kritériummal:

A minta kiegyenlített ha:

$$M_{28\text{ MHz}} - M_{5\text{ MHz}} \geq -0,01 \cdot (M_{28\text{ MHz}} - 14)^2 - 0,18$$

## Szemeken belüli egyenlőtlen nedvesség

10. Bebizonyítottam, hogy a szárítás hatására a gabonaszemekben létrejövő egyenlőtlen nedvességeloszlás szignifikáns a különbséget okoz az Argand ábrán a Maxwell-Wagner relaxációra jellemző húr hossz értékében, ez alapja lehet egy konkrét kiegyenlítettlen/kiegyenlített szétválasztási küszöb meghatározásának

## 6 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A kukorica és szója minták dielektromos görbéit elemezve megállapítottam, hogy elektród polarizáció és a Maxwell-Wagner relaxáció az, ami meghatározza a dielektromos jellemzőket a 100 Hz -28 MHz frekvenciatartományban. A kukorica és szója Argand görbéi leírhatók egy egyenes és egy körív kombinációjával kukorica esetén 31,0 % és szója esetén 22,9% alatti nedvességtartalmakon. Javaslom a további méréseket széles frekvencia tartományban kukorica és szója mintákon elvégezni és ezáltal az Argand görbék illesztett paramétereinek segítségével meghatározni, hogy mely frekvencia tartományokban van a Maxwell-Wagner relaxációnak és elektród polarizációnak jelentősége.

További mérések elvégzését javasolom a tesztcella anyagának és alakjának az elektród polarizációra való hatásának vizsgálatához.

Dolgozatomban nem vizsgáltam a hőmérséklet hatását, ezért új kutatási célnak javasolom, mert további információkat szolgáltathat a vezetési hatások jobb megértéséhez és ezáltal a dielektromos viselkedés teljesebb és pontosabb matematikai modelljének megalkotásához a megahertz alatti frekvenciatartományban.

Javaslom az on-line rendszerekben előforduló nyomás-tartománynak a meghatározását, és eredményeim felhasználásával korrekciós összefüggést fejlesztését e tartományra.

Az inhomogén nedvességeloszlás keverékek és szárított minták esetében is hatással van gabonaminták dielektromos jellemzőire. Javaslom egy robosztusabb diszkriminancia függvény kifejlesztését a száraz-nedves gabona keverékek meghatározására, majd megvizsgálni, hogyan alkalmazható módszer különböző gabona fajokra és tesztcella típusokra.

További mérések elvégzését javaslom a szárított és kiegyenlített minták Argand görbéiből nyert húr hossz segítségével történő elválasztásának finomításához. Kiterjeszteni a módszer alkalmazását kukoricán kívül más gabonára is.





## 7 ÖSSZEFOGLALÁS

A nedvességtartalom az egyik legfontosabb minőségi jellemzője a szemesterményeknek, és bár a nedvességmérőknek közel 100 éves múltja van, még mindig számos megoldatlan kérdés nehezíti a pontos nedvességmérők megalkotását. A nedvességmérők nem közvetlenül a víztartalmat mérik, hanem egy víztartalomtól függő jellemzőt. A mérési pontosság igen sok tényező függvénye. Az olyan mérési eljárások, amelyeket e zavaró tényezők alig befolyásolnak azonban viszonylagos bonyolultságuk, magas költségeik miatt az iparban nem terjedtek el. A kapacitív elven működő berendezések pontosak és méréstechnikájuk egyszerűbb, mint a nagyobb frekvenciákon működő berendezéseknek. A nedvességmérő gyártók gazdaságossági törekvései miatt még mindig van érdeklődés a gabonák 100 MHz alatti tulajdonságai iránt. Ezért kutatásom célja, az online mérésekben, szárítókban, kombájnon előforduló zavaró tényezők dielektromos görbékre gyakorolt hatásának meghatározása volt.

Kutatásom két fő területre irányult. Egyik a halmaztömörödöttség különbségeket okozó hatások, mint különböző betöltési módok és a nyomás dielektromos görbékre gyakorolt hatása és kompenzálásuk lehetőségei Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekcióval. Másik a gabonahalmaz inhomogén nedvesség eloszlásából származó hibák meghatározása és módszerfejlesztés a kiegyenlített gabona kimutatására.

Megállapítottam, hogy a Landau-Lifshitz, Looyenga sűrűségkorrekció 100 kHz felett hatékony, de 100 kHz alatt nem, vagy csak részben alkalmas a különböző halmaztömörödöttségből adódó különbségek kompenzálására. Megmutattam, hogy a nyomás megváltoztatja a gabonák dielektromos tulajdonságait és hatásában különbözik a rázástól. Míg a rázás hatására halmaztömörödöttség jön létre, a növekvő nyomás hatására a vezetési hatások erősödnek fel. Megállapítottam, hogy a változás leírására a húr hossz a legalkalmasabb paraméter, és meghatároztam a húr hossz és a nyomás függvénykapcsolatát. Bizonyítottam, hogy a nyomás hatása annak megszűnése után is látható marad a dielektromos görbéken. Meghatároztam a kukorica keverékekben az inhomogén nedvességeloszlás által okozott nedvességmérési hibát 100 kHz és 28 MHz között és kidolgoztam egy diszkrimináló módszert, amellyel 92 %-os hatékonysággal elkülöníthető a frissen kevert és a kiegyenlített minta relatív dielektromos állandó 5 MHz és 28 MHz történt mérésével. Meghatároztam a szárítás hatására létrejött inhomogén nedvességeloszlás miatt fellépő nedvességmérési hibát 100 kHz és 28 MHz között. Bizonyítottam, hogy szignifikáns különbség van a frissen szárított és a kiegyenlített minta húr hosszai között. Leíró módszert dolgoztam ki a 100 Hz-28 MHz közötti vezetési hatások elkülönítésére 11,2 %-35,2 %-os nedvességű kukorica és 8,8 %-22,9 %-os nedvességű szója mintákon.

## 7.1 SUMMARY

Moisture content is one of the most important grain quality factors, and, despite the 100-year history of grain moisture meters, there are still several unanswered questions that impede the development of accurate moisture meters. Moisture meters do not directly sense moisture content but rather a moisture-dependent physical property. Their accuracy is dependent on numerous factors. Measurement systems affected minimally by these disturbing factors are not used widely in industry due to their complexity and high cost. Capacitive-type equipment are fairly accurate and the applied measurement technologies are simpler than the meters operating at high frequencies. For the financial endeavor of manufacturers designing low cost meters, there is interest in properties of grain below 100 MHz. For this reason the goal of my research was to investigate the effects of disturbing factors to dielectric spectra such as would occur in online measurements in grain driers and on combine harvesters.

My research was focused on two major topics. The first was the impact of the effects causing bulk density variation (such as different loading methods and pressure) on dielectric spectra and the possibility of compensation by the Landau-Lifshitz, Looyenga density correction. The second topic was to determine the error caused by inhomogeneous moisture distributions and to develop a method to identify non-equilibrated grain.

I have found that the Landau-Lifshitz, Looyenga density correction is effective above 100 kHz, but below 100 kHz it is not capable or only partially capable of compensating the variation caused by different bulk densities. I demonstrated that the effect of compressing grain by applying pressure changed the dielectric properties of grain and was different from the effect of shaking to settle the grain. Shaking increases the density of bulk grain more than pressure, but increasing pressure results in stronger conductivity effects. I found that for describing these changes the most efficient parameter was the chord length computed from the Argand diagram, and I have defined the relationship between chord length and applied pressure. I have proved that the effect of pressure on the dielectric spectra remained after the pressure was removed. I have quantified the moisture prediction errors (for measurement frequencies between 100 kHz and 28 MHz) caused by inhomogeneous moisture distribution for blended corn and I have developed a method to discriminate recently mixed and equilibrated samples with 92 % effectiveness by measuring the dielectric constants at 5 MHz and 28 MHz. I have determined the moisture prediction errors (for measurement frequencies between 100 kHz and 28 MHz) as a result of inhomogeneous moisture distributions caused by drying. I have proved that there is significant difference between the chord lengths measured for recently dried and equilibrated samples. I demonstrated a method to differentiate between conductivity effects for corn in the 11.2 % - 35.5 % moisture range and for soybeans in 8.8 % - 22.9 % moisture range.

## 8 MELLÉKLETEK

### M1. IRODALOMJEGYZÉK

Agilent Technologies (2006). Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials.

Bonifacio-Maghirang, E., M. R. Paulsen, L. D. Hill and K. L. Bender (1997): Single Kernel Moisture Variation and Fungal Growth of Blended Corn. *Applied Engineering in Agriculture* 13(1): 81-89.

Brenner, C. A., Z. Gillay, D. B. Funk and R. O. Pierce (2011): Limitations of Dielectric Methods Is it possible to Sense Oil and Protein Content in Grains? ISEMA, Kansas City, MO, USA.

Briggs, L. J. (1908). An Electrical Resistance Method for the Rapid Determination of the Moisture Content of Grain. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, Bureau of Plant Industry.

Büchmann, N. B. and S. Runfors (1995): The Standardization of Infratec 1221 Near Infrared Transmission Instruments in the Danish Network Used for the Determination of Protein and Moisture in Grains. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 3(1): 35-42.

Burden, B. (1998). Working Instructions for Air Oven Methods. WI No: AO1-10. Kansas City, Missouri, USDA-GIPSA-TSD.

Bye, S. (1986): Checking and Handling Moisture Rebound in Seeds. *The Sunflower*(Aug/Sept): 18-20.

Cole, K. S. and R. H. Cole (1941): Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. *Journal of Chemical Physics* 9: 341-351.

Cowe, I. A. and A. M. C. Davies (1995): Permanent Samples for Standardizing Near Infrared Instruments. *Near Infrared Spectroscopy: The Future Waves--Proceedings of the 7th International Conference on Near Infrared Spectroscopy*. A. M. C. Davies and P. Williams. Chichester, Eng., NIR Publications: 119-121.

Debye, P. (1929): *Polar Molecules*. New York, Chemical Catalog Company.

Emmert, S., M. Wolf, R. Gulich, S. Krohns, S. Kastner, P. Lunkenheimer and A. Loidl (2011): Electrode polarization effects in broadband dielectric spectroscopy. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems* 83(2): 157-165.

Evans, D. E. (1982): The influence of temperature and grain moisture content on the intrinsic rate of increase of *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research* 18(2): 55-66.

- Federal Grain Inspection Service (1997). Sample Collection Responsibilities for Verifying the Accuracy of Moisture Meter Calibrations. Washington, D.C., United States Department of Agriculture.
- Foster, K. R. and H. Schwan, P. (1989): Dielectric properties of tissues and biological materials: a critical review. *Crit. Rev. Biomed. Eng.* 17(1): 25-104.
- Friesen, T. L., G. H. Brusewitz and R. L. Lowery (1988): An acoustic method of measuring moisture content in grain. *Journal of Agricultural Engineering Research* 39(1): 49-56.
- Funk, D. B. (1990): Uniformity in Dielectric Grain Moisture Measurement. Uniformity by 2000--Highlights of an International Workshop on Maize and Soybean Quality. L. D. Hill. Champaign, Ill., Scherer Communications: 69-91.
- Funk, D. B. (1997): Improving Accuracy and Uniformity of Measuring Moisture in the Market Channel. Managing Moisture in Grains and Oilseeds: 1997 Grain Quality Conference, Urbana, Illinois, University of Illinois.
- Funk, D. B. (1998): The State of Grain Moisture Measurement in the United States. Third International Symposium on Humidity & Moisture, London, England, National Physical Laboratory.
- Funk, D. B. (1999): Dielectric Grain Moisture Measurement--Practical, Technical, and Regulatory Issues. Third Workshop on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, Athens, Georgia, USDA - Agricultural Research Service.
- Funk, D. B. (2001). An investigation of the nature of the radio-frequency dielectric response in cereal grains and oilseeds with engineering implications for grain moisture meters. PhD Physics and Engineering, University of Missouri-Kansas City.
- Funk, D. B. and L. R. Engebretson (1996). Progress in Grain Quality Inspection. ASAE Annual Meeting. Phoenix, Ariz., American Society of Agricultural Engineers.
- Funk, D. B. and Z. Gillay (2010): Dielectric Reference Materials for Mathematically Modeling and Standardizing Grain Moisture Meters. *Transactions of the ASABE* 53(1): 271-281.
- Funk, D. B. and Z. Gillay. (2012). "UnifiedGrain MoistureAlgorithm Recipe Book." from <http://www.gipsa.usda.gov/fgis/equipment/UGMA%20Recipe%20Book11-15-2012.pdf>.
- Funk, D. B., Z. Gillay and P. Meszaros (2007): Unified moisture algorithm for improved RF dielectric grain moisture measurement. *Measurement Science & Technology* 18(4): 1004-1015.
- Funk, D. B. and W. E. Midden (1978). Analysis Instrument. U. S., Dickey-John Corporation.
- Géczi, G. and P. Sembery (2002): Connections for Determining the Dielectric Properties of Agricultural Products. *Hungarian Agricultural Research* 12: 12-19.

- Gillay, Z. (2010). Dielektromos nedvességmérők kalibrációátvitelét befolyásoló tényezők. PhD., BCE.
- Grimnes, S. and Ø. G. Martinsen (2000): Chapter 4 - Electrical properties of tissue. Bioimpedance and Bioelectricity Basics. London, Academic Press: 87-125.
- Hardy, C. L., G. R. Rippke, C. R. Hurburgh, Jr. and T. J. Brumm (1995): Calibration and Field Standardization of Foss Grainspec Analyzers for Corn and Soybeans. Near Infrared Spectroscopy: The Future Waves--Proceedings of the 7th International Conference on Near Infrared Spectroscopy. A. M. C. Davies and P. Williams. Chichester, Eng., NIR Publications: 132-141.
- Hart, J. R. (1967): A Method for Detecting Mixtures of Artificially Dried Corn with High-Moisture Corn. International Cereal Chemistry 44(1): 601-606.
- Hasted, J. B. (1973): Aqueous Dielectrics. London, Chapman and Hallp.
- Hasted, J. B. (1973): The Dielectric Properties of Heterogeneous Substances. Aqueous Dielectrics. London, Chapman and Hall: 117-135.
- Hasted, J. B. (1973): The Water Molecule and Dielectric Theory. Aqueous Dielectrics. London, Chapman and Hall: 302.
- Hemeda, M. A., C. R. Hurburgh and C. J. Bern (1982): Effects of corn variety, mechanical damage and drying temperature on electronic moisture meters. Paper, American Society of Agricultural Engineers(82-3547): 23 pp.
- Hilhorst, M. A. (1998). Dielectric Characterisation of Soil Doctoral Thesis, Wageningen Agricultural University.
- Hlynka, I. and W. Bushuk (1959): The weight per bushel. Cereal Science Today 4: 239-240.
- Hoffman, K. J. and L. D. Hill (1976): Historical Review of the U.S. Grades and Standards for Grain. Illinois Agricultural Economics 16(1): 1-9.
- Jones, R. N. (1978). Electrical Characteristics of Corn, Wheat, and Soya in the 1-200 MHz Range. Boulder, Colorado, National Bureau of Standards.
- Klein, R. J., S. Zhang, S. Dou, B. H. Jones, R. H. Colby and J. Runt (2006): Modeling electrode polarization in dielectric spectroscopy: Ion mobility and mobile ion concentration of single-ion polymer electrolytes. The Journal of chemical physics 124: p. 144903.
- Kocsis, L., M. Herdovics, J. Deákvári and L. Fenyvesi (2011): Corn drying experiments by pilot dryer. International Scientific Conference Biosystems Engineering 2011, Tartu, Estonia, 12-13 May 2011., Estonian Research Institute of Agriculture.

- Kraszewski, A. W. (1977): Prediction of the dielectric properties of two-phase mixtures. *J. Microwave Power* 12(3): 215-222.
- Kraszewski, A. W., S. Trabelsi and S. O. Nelson (1999): Temperature-compensated and density-independent moisture content determination in shelled maize by microwave measurements. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72(1): 27-35.
- Kuang, W. and S. O. Nelson (1998): Low-frequency dielectric properties of biological tissues: A review with some new insights. *Transactions of the ASAE* 41(1): 173-184.
- Landau, L. D. and E. M. Lifshitz (1960): *Electrodynamics of Continuous Media*. Oxford, England, Pergamon Press.p.
- Lawrence, K. C., S. O. Nelson and A. W. Kraszewski (1990): Temperature-Dependence of the Dielectric-Properties of Wheat. *Transactions of the ASAE* 33(2): 535-540.
- Looyenga, H. (1965): Dielectric Constants of Heterogeneous Mixtures. *Physica* 31: 401-406.
- Martin, C. R., Z. Czuchajowska and Y. Pomeranz (1986): Aquagram Standard Deviations of Moisture in Mixtures of Wet and Dry Corn. *Cereal Chemistry* 63(5): 442-445.
- Meszaros, P. and D. B. Funk (2005): Measurement of moisture in grains at extreme temperatures - Very high frequency dielectric method. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 82(1): 253-260.
- Montross, M. D., F. W. Bakker-Arkema and R. E. Hines (1999): Moisture Content Variation and Grain Quality of Corn Dried in Different High-Temperature Dryers. *Transactions of the ASABE* 42(2): 427-433.
- MSZ6367/3-83 (1983). Élelmezési, takarmányozási ipari magvak és hántolt termények vizsgálata, Nedvességtartalom meghatározása: 9.
- Nelson, S. O. (1977): Use of Electrical Properties for Grain-Moisture Measurement. *Journal of Microwave Power* 12(1): 67-72.
- Nelson, S. O. (1978): Frequency and Moisture Dependence of the Dielectric Properties of High-Moisture Corn. *Journal of Microwave Power* 13(2): 213-218.
- Nelson, S. O. (1981): Review of Factors Influencing the Dielectric Properties of Cereal Grains. *Cereal Chemistry* 58(6): 487-491.
- Nelson, S. O. (1983): Density Dependence of the Dielectric-Properties of Particulate Materials. *Transactions of the ASAE* 26(6): 1823-&.
- Nelson, S. O. (1983). Moisture, Frequency, and Density Dependence of the Dielectric Constant of Shelled, Yellow-Dent Field Corn. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural Engineers.

- Nelson, S. O. (1983): Observations on the Density Dependence of Dielectric-Properties of Particulate Materials. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 18(2): 143-152.
- Nelson, S. O. (1991): Dielectric-Properties of Agricultural Products - Measurements and Applications. *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 26(5): 845-869.
- Nelson, S. O. (1992): Correlating Dielectric-Properties of Solids and Particulate Samples through Mixture Relationships. *Transactions of the ASAE* 35(2): 625-629.
- Nelson, S. O. (1996): Determining dielectric properties of coal and limestone by measurements on pulverized samples. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 31(4): 215-220.
- Nelson, S. O. (2005): Density-permittivity relationships for powdered and granular materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 54(5): 2033-2040.
- Nelson, S. O. and K. C. Lawrence (1991): Kernel Moisture Variation on the Ear in Yellow-Dent Field Corn. *Transactions of the ASAE* 34(2): 513-516.
- Nelson, S. O., K. C. Lawrence and C. V. K. Kandala (1990): Comparison of Rf Impedance and Dc Conductance Sensing for Single-Kernel Moisture Measurement in Corn. *Transactions of the ASAE* 33(2): 637-641.
- Nelson, S. O. and L. E. Stetson (1975): 250-Hz to 12-GHz Dielectric Properties of Grain and Seed. *Transactions of the ASAE* 18(4): 714-&.
- Nelson, S. O. and L. E. Stetson (1976): Frequency and Moisture Dependence of Dielectric Properties of Hard Red Winter Wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research* 21(2): 181-192.
- Nelson, S. O. and T. S. You (1990): Use of Dielectric Mixture Equations for Estimating Permittivities of Solids from Data on Pulverized Samples. *Physical Phenomena in Granular Materials* 195: 295-300.
- Pomeranz, Y. and Z. Czuchajowska (1986): Rapid and Simple Detection of a Mixture of Wet and Dry Corn. *Cereal Chemistry* 63(3): 283-284.
- Russel, W. B., D. A. Saville and W. R. Schowalter (1989): *Colloidal Dispersions* Cambridge, England, Cambridge University Press.
- Sembery, P. (1976). *Mezőgazdasági Szemes- és Szálasanyagok Dielektromos Jellemzői. Kandidátusi Értekezés.*
- Sembery, P. (2002): *Mezőgazdasági termények dielektromos jellemzői.* Budapest, Akadémiai Kiadó.

- Sembery, P., G. Géczi, M. Kovács and M. Douba (1999): High Frequency and Microwave Dielectric Properties of Food Material. *Hungarian Agricultural Engineering* 12: 15-19.
- Sembery, P., G. Géczi and G. Váczy (2001): Measurement Methods of Dielectric Properties of Mustard Seeds at Microwave Frequency. *Hungarian Agricultural Research* 10(3): 16-18.
- Serdyuk, V. M. (2008): Dielectric Study of Bound Water in Grain at Radio and Microwave Frequencies. *Progress in Electromagnetics Research* 84: 379-406.
- Shenk, J. S. and M. O. Westerhaus (1995): Comparison of Standardization Techniques. *Near Infrared Spectroscopy: The Future Waves--Proceedings of the 7th International Conference on Near Infrared Spectroscopy*. A. M. C. Davies and P. Williams. Chichester, Eng., NIR Publications: 112-115.
- Sokhansanj, S. and S. O. Nelson (1988): Transient Dielectric Properties of Wheat Associated with Nonequilibrium Kernel Moisture Conditions. *Transactions of the ASAE* 31(4): 1251-1254.
- Thorpe, G. R. (1981): Moisture diffusion through bulk grain. *Journal of Stored Products Research* 17(1): 39-42.
- Trabelsi, S. and S. O. Nelson (1998): Density-independent functions for on-line microwave moisture meters: a general discussion. *Measurement Science & Technology* 9(4): 570-578.
- Trabelsi, S. and S. O. Nelson (2006): Temperature-dependent behaviour of dielectric properties of bound water in grain at microwave frequencies. *Measurement Science & Technology* 17(8): 2289-2293.
- Trabelsi, S. and S. O. Nelson (2007): On the accuracy of bulk density and moisture content prediction in wheat from near-field free-space measurements. *Tm-Technisches Messen* 74(5): 280-289.
- Trabelsi, S. and S. O. Nelson (2007): Unified microwave moisture sensing technique for grain and seed. *Measurement Science & Technology* 18(4): 997-1003.
- Trabelsi, S. and S. O. Nelson (2008): Microwave dielectric sensing of moisture content in shelled peanuts independent of bulk density and with temperature compensation. *2008 IEEE Sensors Applications Symposium*: 51-53.
- USDA-GIPSA. (2012). "Equipment." from <http://www.gipsa.usda.gov/fgis/equipment.html>.
- von Hippel, A. (1995): *Complex Permittivity and Permeability*. Dielectrics and Waves. Boston, Artech House. 1.
- von Hippel, A. (1995): *Interfacial and Space-Charge Polarization*. Dielectrics and Waves. Boston, Artech House. 1.



- von Hippel, A. (1995): Representation of Dielectrics by Lumped Circuit Equivalents. Dielectrics and Waves. Boston, Artech House. 1.
- Wilhelm, L. R., D. A. Suter and G. H. Brusewitz (2004): Drying and dehydration. Food Process Engineering Technology. St. Joseph, Michigan: 259-284.
- Witten Jr, T. A. and S. R. Nagel (1975): Argand diagrams of dielectric response. Solid State Communications 16(2): 185-188.
- Zimmerman, D. C. (1976): Determination of Moisture Content in Sunflowers with Electronic Moisture Meters. Journal of the American Oil Chemists Society 53(8): 548-550.



## M2. RELATÍV DIELEKTROMOS ÁLLANDÓ FELSŐ HATÁR SZÁMOLÁSA

A vízmolekulák orientációjából származó maximális relatív dielektromos állandó meghatározása a nedvességtartalom függvényében gabonaminták esetén.

A Landau-Lifshitz, Looyenga egyenletet 2 komponensű keverékekre felírva:

$$\varepsilon_{keverék}^{\frac{1}{3}} = v_1 \cdot \varepsilon_1^{\frac{1}{3}} + v_2 \cdot \varepsilon_2^{\frac{1}{3}} \rightarrow \varepsilon_{keverék} = \left( v_1 \cdot \varepsilon_1^{\frac{1}{3}} + v_2 \cdot \varepsilon_2^{\frac{1}{3}} \right)^3 \quad (39)$$

ahol  $\varepsilon_{keverék}$  a keverék relatív dielektromos állandója,  $v_1$  és  $v_2$  a keveréket alkotó komponensek relatív térkitöltése,  $\varepsilon_1$  és  $\varepsilon_2$  a komponensek relatív dielektromos állandója. Alkalmazva a (22) egyenletet egy gabonamintára, ahol a gabonaminta felfogható a nedves magok és a levegő keverékeként:

$$\varepsilon_{gabonaminta} = \left( v_{nedves\ mag} \cdot \varepsilon_{nedves\ mag}^{\frac{1}{3}} + v_{levegő} \cdot \varepsilon_{levegő}^{\frac{1}{3}} \right)^3 \quad (40)$$

ahol  $\varepsilon_{gabonaminta}$  a gabonaminta relatív dielektromos állandója,  $\varepsilon_{nedves\ mag}$  és  $\varepsilon_{levegő}$  a nedves mag és a levegő relatív dielektromos állandója,  $v_{nedves\ mag}$  és  $v_{levegő}$  a nedves mag és a levegő fajlagos térfogata. Tudjuk, hogy a nedves mag és a levegő fajlagos térfogata felírható:

$$v_{nedves\ mag} = \frac{V_{nedves\ mag}}{V} \quad \text{és} \quad v_{levegő} = \frac{V_{levegő}}{V} \quad (41)$$

és

$$V_{nedves\ mag} + V_{levegő} = V \quad (42)$$

ahol  $V_{nedves\ mag}$  a nedves magok térfogata,  $V_{levegő}$  a levegő térfogata,  $V$  az össztérfogat

A (4) egyenletben mindkét oldalt elosztva  $V$ -vel:

$$\frac{V_{nedves\ mag}}{V} + \frac{V_{levegő}}{V} = 1 \quad (43)$$

$$v_{nedves\ mag} + v_{levegő} = 1 \quad (44)$$

$$v_{levegő} = 1 - v_{nedves\ mag} \quad (45)$$

A (5) egyenletet behelyettesítve a (1) egyenletbe és felhasználva, hogy a levegő relatív dielektromos állandója 1:

$$\varepsilon_{gabona\ minta} = \left( v_{nedves\ mag} \cdot \varepsilon_{nedves\ mag}^{\frac{1}{3}} + (1 - v_{nedves\ mag}) \cdot \varepsilon_{levegő}^{\frac{1}{3}} \right)^3 \quad (46)$$

$$\varepsilon_{gabona\ minta} = \left[ \left( \varepsilon_{nedves\ mag}^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \cdot v_{nedves\ mag} + 1 \right]^3 \quad (47)$$

Egy átlagos mintára a nedves mag fajlagos térfogata megbecsülhető. Az egyenletben a  $\varepsilon_{nedves\ mag}$  az ismeretlen, amit az alábbi módon határoztam meg, felírva újra a Landau-Lifshitz, Looyenga egyenletet egy “csontszáraz” gabonaszem (továbbiakban száraz mag) és a víz keverékeként:

$$\varepsilon_{nedves\ mag} = \left( \varepsilon_{víz}^{\frac{1}{3}} \cdot v_{víz} + \varepsilon_{száraz\ mag}^{\frac{1}{3}} \cdot v_{száraz\ mag} \right)^3 \quad (48)$$

ahol  $\varepsilon_{nedves\ mag}$  a nedves mag relatív dielektromos állandója,  $\varepsilon_{víz}$  és  $\varepsilon_{száraz\ mag}$  a víz és a száraz magrészt relatív dielektromos állandója,  $v_{víz}$  és  $v_{száraz\ mag}$  a nedves magban lévő víz és a száraz magrészt fajlagos térfogata. Ez utóbbiakat az alábbi módon határoztam meg felhasználva a nedves mag nedvességtartalmát (M):

$$M = \frac{m_{víz}}{m_{víz} + m_{száraz\ mag}} = \frac{V_{víz} \cdot \rho_{víz}}{V_{víz} \cdot \rho_{víz} + V_{száraz\ mag} \cdot \rho_{száraz\ mag}} \quad (49)$$

ahol  $m_{víz}$  és  $m_{száraz\ mag}$  a nedves magban lévő víz és a száraz magrészt tömege,  $V_{víz}$  és  $V_{száraz\ mag}$  a nedves magban lévő víz és a száraz magrészt térfogata,  $\rho_{víz}$  és  $\rho_{száraz\ mag}$  a nedves magban lévő víz és a száraz magrészt sűrűsége. A (8) egyenletben szereplő nedves mag nedvességtartalmát fajlagos térfogatokkal felírva:

$$M = \frac{\frac{V_{víz}}{V_{mag}} \cdot \rho_{víz}}{\frac{V_{víz}}{V_{mag}} \cdot \rho_{víz} + \frac{V_{száraz\ mag}}{V_{mag}} \cdot \rho_{száraz\ mag}} = \frac{v_{víz} \cdot \rho_{víz}}{v_{víz} \cdot \rho_{víz} + v_{száraz\ mag} \cdot \rho_{száraz\ mag}} \quad (50)$$

Tudjuk, hogy  $v_{víz} + v_{száraz\ mag} = 1$ . Felhasználva, hogy  $\rho_{víz} = 1$  g/ml a (9) egyenletet felírhatjuk az alábbi módokon:

$$M = \frac{v_{víz}}{v_{víz} + (1 - v_{víz}) \cdot \rho_{száraz\ mag}} \rightarrow v_{víz} \quad (51)$$

$$M = \frac{1 - v_{száraz\ mag}}{1 - v_{száraz\ mag} + v_{száraz\ mag} \cdot \rho_{száraz\ mag}} \rightarrow v_{száraz\ mag} \quad (52)$$

Az előbbi egyenletekből  $v_{víz}$ -t és  $v_{száraz\ mag}$ -ot kifejezve az alábbi összefüggéseket kapjuk:

$$v_{v\acute{e}z} = \frac{M \cdot \rho_{sz\acute{a}raz\ mag}}{M \cdot (\rho_{sz\acute{a}raz\ mag}^{-1}) + 1} \quad (53)$$

$$v_{sz\acute{a}raz\ mag} = \frac{1-M}{M \cdot (\rho_{sz\acute{a}raz\ mag}^{-1}) + 1} \quad (54)$$

A (10) és (11) egyenleteket behelyettesítve a (12) egyenletbe a nedves gabona mag relatív dielektromos állandóját felírhatjuk az alábbi módon:

$$\varepsilon_{nedves\ mag} = \left( \varepsilon_{v\acute{e}z}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{M \cdot \rho_{sz\acute{a}raz\ mag}}{M \cdot (\rho_{sz\acute{a}raz\ mag}^{-1}) + 1} + \varepsilon_{sz\acute{a}raz\ mag}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{1-M}{M \cdot (\rho_{sz\acute{a}raz\ mag}^{-1}) + 1} \right)^3 \quad (55)$$

ahol  $\varepsilon_{nedves\ mag}$  és  $\varepsilon_{sz\acute{a}raz\ mag}$  a nedves és a száraz gabonaszem relatív dielektromos állandója,  $\varepsilon_{v\acute{e}z}$  a víz relatív dielektromos állandója,  $\rho_{sz\acute{a}raz\ mag}$  a “csontszáraz” gabonaszem sűrűsége, M a nedves mag nedvességtartalma. A nedves mag relatív dielektromos állandója becsülhető az irodalmi adatokból.

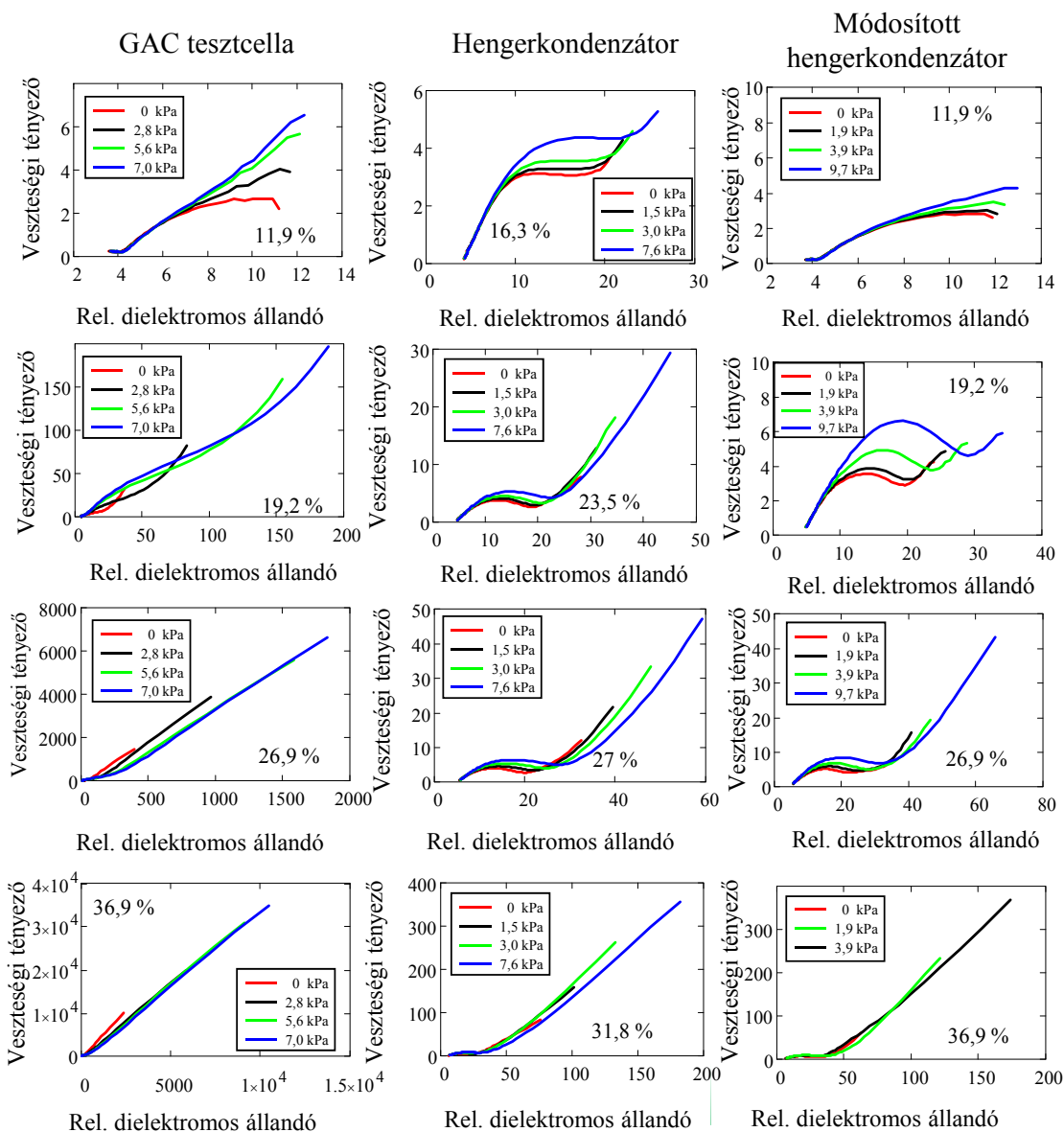
Az előbbi összefüggést felírva egy nedves gabonaszemekből és a levegő keverékéből álló gabonamintára (felhasználva, hogy a levegő relatív dielektromos állandója 1 és sűrűsége a keverékben megközelítően 0):

$$\varepsilon_{gabonaminta} = \left[ v_{nedves\ mag} \cdot \left( \varepsilon_{v\acute{e}z}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{M \rho_{sz\acute{a}raz\ mag}}{M \cdot (\rho_{sz\acute{a}raz\ mag}^{-1}) + 1} + \varepsilon_{sz\acute{a}raz\ mag}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{(1-M)}{M \cdot (\rho_{sz\acute{a}raz\ mag}^{-1}) + 1} - 1 \right) + 1 \right]^3 \quad (56)$$

ahol  $\varepsilon_{gabonaminta}$  a teljes gabonaminta (nedves gabonaszemek és a levegő) relatív dielektromos állandója,  $v_{nedves\ mag}$  a mintában a nedves gabonaszemek fajlagos térfogata. Az így kapott összefüggéssel számolt értéknél nagyobb (mért) relatív dielektromos állandó nem magyarázható csak a poláris vízmolekulák forgásával. A számításhoz felhasználtuk az alábbiakat:  $\varepsilon_{v\acute{e}z}=78,5$ ,  $v_{nedves\ mag}=0,7$ ,  $\rho_{sz\acute{a}raz\ mag}=1,4$  g/ml és  $\varepsilon_{sz\acute{a}raz\ mag}=2$ .

### M3. NYOMÁS HATÁSA AZ ARGAND GÖRBÉKRE

Dielektromos mérés nyomás alatt					
GAC tesztcella		Hengerkondenzátor		Módosított hengerkondenzátor	
Erő (N)	Nyomás (kPa)	Erő (N)	Nyomás (kPa)	Erő (N)	Nyomás (kPa)
0	0.0	0	0.0	0	0.0
5	1.4	5	-	5	-
10	2.8	10	1.5	10	1.9
15	4.2	15	-	15	-
20	5.6	20	3.0	20	3.9
25	7.0	25	-	25	-
50	-	50	7.6	50	9.7
75	-	75	11.4	75	14.6
100	-	100	15.2	100	19.4



Különböző nedvességtartalmú kukorica minták Argand ábrái.

# KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

## **EZÚTON IS SZERETNÉM MEGKÖSZÖNNI:**

- dr. Fekete András professzor úrnak, hogy elindított ezen az úton, és hogy a hosszú évek alatt mindig támogatott,
- dr. David Funknak a több éven át tartó önzetlen segítségét,
- dr. Felföldi József professzor úrnak minden emberi és szakmai segítségét,
- Férfjemnek, dr. Gillay Zoltánnak a szakmai segítségét és hogy időt és a háttérrel biztosított a számomra,
- dr. Vozáry Eszternek az értékes tanácsait,
- Linda M. Funknak az angol nyelvben nyújtott segítségét
- A Fizika-Automatika Tanszék minden dolgozójának a támogatást,

## **SZERETNÉK TOVÁBBÁ KÖSZÖNETET MONDANI:**

- Családomnak és barátaimnak a biztatást és mindazt a segítséget, amely nélkül e dolgozat nem készülhetett volna el.
- Fiaimnak, Gergelynek, Benedeknek és Ágostonnak a támogatást és a türelmet.