



DIELEKTROMOS NEDVESSÉGMÉRŐK KALIBRÁCIÓÁTVITELÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

Doktori értekezés

Készítette:

Gillay Zoltán

Konzulensek:

Dr. David B. Funk

Dr. Fekete András

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

Budapest, 2010

A doktori iskola

megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

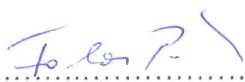
tudományága: Élelmiszertudományok


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

Témavezetők: Dr. David B. Funk, PhD, DSc (hc)
Associate Director for Methods Development
USDA-GIPSA-Technical Services Division

Dr. Fekete András, DSc
egyetemi tanár
Budapesti Corvinus Egyetem,
Élelmiszertudományi Kar,
Fizika-Automatika Tanszék

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, a műhelyvita során elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés védési eljárásra bocsátható.


.....
Az iskolavezető jóváhagyása


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

A Budapesti Corvinus Egyetem Élettudományi Területi Doktori Tanács 2010-03-09-ki határozatában a nyilvános vita lefolytatására az alábbi Bíráló Bizottságot jelölte ki:

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG:

Elnöke:

Békássyné Molnár Erika, DSc

Tagjai:

Farkas István, DSc

Salgó András, DSc

Fenyvesi László, PhD

Badakné Kerti Katalin, PhD

Opponensek:

Kaffka Károly, CSc

Sembery Péter, CSc

Titkár:

Badakné Kerti Katalin, PhD

TARTLOMJEGYZÉK

1	BEVEZETÉS.....	1
2	IRODALMI ÁTTEKINTÉS	3
2.1	NEDVESSÉGTARTALOM.....	3
2.1.1	A nedvességtartalom mérése	3
2.2	PERMITTIVITÁS	4
2.2.1	Statikus dielektromos állandó	4
2.2.2	Komplex relatív permittivitás	4
2.2.2.1	Permittivitás frekvenciafüggése, relaxációs mechanizmusok.....	5
2.2.3	A víz permittivitása	6
2.2.3.1	Gabonában lévő víz	7
2.2.4	Szemcsés anyagok permittivitása.....	7
2.2.4.1	Legfontosabb összefüggések	8
2.2.5	Vezetési hatások.....	10
2.3	GABONA DIELEKTROMOS TULAJDONSÁGAI	10
2.3.1	Nedvességtartalom	10
2.3.2	Frekvencia.....	11
2.3.3	Halmazsűrűség.....	11
2.3.3.1	Sűrűségfüggetlen kalibrációk	13
2.3.3.2	Betöltés és cella kialakítás	14
2.3.4	Hőmérséklet	14
2.4	PERMITTIVITÁS- ÉS NEDVESSÉGMÉRÉS	15
2.4.1	Vezetőképességen alapuló módszerek	15
2.4.2	Kapacitív mérések elmélete	15
2.4.3	Kapacitív mérés technika.....	17
2.4.4	VHF és mikrohullámú mérések elmélete	17
2.4.5	Mikrohullámú mérés technikák	20
2.4.6	VHF mérés technikák.....	21
2.4.6.1	Nyitott végű koaxiális érzékelő	21
2.4.6.2	Koaxiális cella reflexiós módban.....	21
2.4.6.3	Koaxiális tápvonalak	22
2.4.6.4	Párhuzamos falú tesztcella.....	22
2.4.6.5	Az általunk is használt tesztcella	22
2.5	AZ ÚJ EGYESÍTETT GABONANEDVESSÉG-MÉRÉSI MÓDSZER	24
2.5.1	Alkalmas frekvencia kiválasztása	25
2.5.2	Sűrűségkorrekció.....	26
2.5.3	Egyesítő paraméterek	26
2.5.4	Hőmérsékletkorrekció	28
2.5.5	Az algoritmus pontossága.....	29
2.5.6	Felmerült kutatási kérdések	29

2.6	MÉRŐMŰSZEREK PONTOSSÁGA ÉS EGYSÉGESÍTÉSE.....	30
2.6.1	Nedvességmérési eredmények eltéréseinek okai	30
2.6.2	Szervezetek és szabályok.....	31
2.6.3	Eddigi törekvések és eredmények.....	32
2.7	OSZTOTT PARAMÉTERŰ HÁLÓZATSZÁMÍTÁS ELMÉLETE	32
2.7.1	Tápvonal	32
2.7.2	Hálózatok jellemzése szórási paraméterekkel	34
2.7.3	Lezárás.....	35
2.7.4	Átmeneti szakasz elmélete.....	36
2.7.5	ABCD mátrix reprezentáció	36
2.7.6	Kvázi-TEM módus	37
2.7.7	Szkinhatás	38
2.8	Az irodalom összefoglalása és hipotézisek	39
2.8.1	Hipotézisek	39
3	CÉLKITŰZÉS.....	41
	A célok eléréséhez szükséges feladatok.....	41
4	ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK.....	43
4.1	MÉRÉSI ÖSSZEÁLLÍTÁSOK ÉS ESZKÖZÖK	43
4.1.1	Cellák.....	43
4.1.1.1	Mester tesztcella	43
4.1.1.2	Prototípus tesztcella.....	44
4.1.2	Mérőműszerek és mérési összeállítások.....	44
4.1.3	Az alkalmazott betöltések.....	45
4.2	A MÉRÉS ÁLTALÁNOS MENETE	46
4.3	ANYAGOK.....	47
4.3.1	Kalibrációs anyagok	47
4.3.2	Sztenderdizációs anyagok.....	49
4.3.2.1	Gabonák.....	49
4.3.2.2	Szervetlen szilárd anyagok	49
4.3.3	Betöltési hatások vizsgálatához használt gabonák.....	51
4.3.4	Kalibrációátvitel.....	52
4.4	KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK	53
4.4.1	Tesztcella-konstrukciók és modellalkotás	53
4.4.2	A tesztcella dielektromos kalibrációja	54
4.4.2.1	Célfüggvények.....	54
4.4.3	Sztenderdizáció	56
4.4.3.1	Adott frekvencián, több mintával végzett sztenderdizáció	56
4.4.3.2	Több frekvencián, kevés mintával végzett sztenderdizáció.....	58
4.4.4	Betöltési módszerek vizsgálatának kiértékelése	58
4.4.5	A szemek térbeli orientációja	59

5	EREDMÉNYEK.....	61
5.1	TESZTCELLA-KONSTRUKCIÓK.....	61
5.1.1	Tesztcella típusok és konfigurációk.....	61
5.1.2	Geometriai méretek.....	62
5.1.3	Mérési módok.....	63
5.1.4	Frekvencia.....	65
5.1.5	Csak a reflexiós tényező nagyságának használata.....	67
5.2	TESZTCELLAMODELLEZÉS.....	71
5.2.1	Jelfolyamábrás megközelítés.....	71
5.2.2	ABCD mátrix megközelítés.....	72
5.2.2.1	A modell matematika felépítése.....	72
5.2.3	A modell paramétereinek meghatározása.....	75
5.2.3.1	Hullámellenállások.....	75
5.2.3.2	Szkinhatás.....	76
5.2.3.3	Geometriai méretek.....	77
5.2.3.4	Veszteségi tényező.....	77
5.2.3.5	Permittivitások.....	77
5.2.3.6	Az átmeneti szakasz helyettesítő-impedanciái.....	78
5.2.3.7	Kitöltési tényező és ürescella-korrekción.....	78
5.2.4	A tesztcella kalibrációja és a modellek eredményeinek az összehasonlítása.....	79
5.3	TESZTCELLA-SZTENDERDIZÁCIÓ.....	81
5.3.1	Gabona, mint sztenderdizációs anyag.....	81
5.3.1.1	Adott frekvencián több mintával végzett sztenderdizáció.....	81
5.3.1.2	Több frekvencián kevés mintával végzett sztenderdizáció.....	84
5.3.2	Szervetlen szilárd anyagok.....	87
5.3.2.1	Az eredményekből levonható következtetések.....	89
5.4	A BETÖLTÉS HATÁSA A GABONANEDVESSÉG-MÉRÉSRE.....	91
5.4.1	Szórás eredmények.....	91
5.4.1.1	A tömeg szórása.....	91
5.4.1.2	A nedvesség szórása.....	92
5.4.1.3	Az LLL korrekció hatása.....	94
5.4.2	A nedvességmérési eredmények eltérése.....	96
5.4.2.1	A nedvességtartalom hatása az eltérésre.....	97
5.4.2.2	LLL sűrűségkorrekció hatása a nedvességkülönbségre.....	98
5.4.3	A lehetséges okok vizsgálata.....	99
5.4.3.1	A sűrűségkülönbség hatása.....	99
5.4.3.2	A szem alakjának hatása.....	100
5.4.3.3	A héj hatása.....	102
5.5	A GABONASZEMEK TÉRBELI ORIENTÁCIÓJÁNAK HATÁSA.....	103
5.5.1	A szemek orientációja tölcseres, gyors és kézi betöltés hatására.....	103
5.5.1.1	2-dimenziós Fourier transzformált.....	104
5.5.1.2	A szemek orientációja a felülnézeti képeken.....	105

5.5.2	A szemek iránya és a nedvességkülönbség kapcsolata	106
5.5.3	Közvetlen bizonyíték az orientáció hatására	107
5.5.3.1	Az orientáció hatása a mért permittivitásra	109
5.5.4	Lehetséges korrekciók	109
5.5.4.1	Korrekciók a VHF-UGMA-hoz.....	110
5.5.4.2	Korábbi eredmények magyarázata.....	112
5.5.4.3	Technikai ötletek	112
5.6	A NEDVESSÉGMÉRÉSI KALIBRÁCIÓ ÁTVITELE	113
5.6.1	Korrekció nélküli kalibrációátvitel	113
5.6.2	Kalibrációátvitel gabonafaj-függő korrekcióval	115
5.6.3	A kalibrációátviteli-paraméterek meghatározásának lehetősége	118
5.7	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	119
6	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	121
7	Összefoglalás.....	123
7.1	Summary	124
	Mellékletek.....	125
M1.	IRODALOMJEGYZÉK	125
M2.	A VHF-UGMA folyamatábrája	131
M3.	Hálózatszámítási paraméterek konverziós táblázata	132
M4.	Sztenderdizációs anyagok	133
M5.	Sztenderdizációs célfüggvények	134
M6.	Betöltés hatásvizsgálatának eredményei.....	135
M7.	Átlátszó doboz az orientáció vizsgálatához	142
M8.	2D Fourier algoritmus.....	142
M9.	A felülnézeti képek 2D Fourier analízisének lépései	143
M10.	Oldalnézeti képek és 2D Fourier transzformáltjai.....	144
M11.	A 2D Fourier transzformált képek intenzitásai	145
M12.	ABCD modell.....	146
M13.	Mester tesztcella paraméterei	147
M14.	Betöltésekhez tartozó tömegek átlagértékei.....	148
M15.	Felülnézeti képek.....	149
M16.	Tésztamérés az orientáció hatásának bizonyítására	150
M17.	Célfüggvény a korrekciók meghatározásához	151
M18.	Kalibrációátvitel lineáris korrekciókkal.....	152

1 BEVEZETÉS

Több éve tartó kutatásunkkal a gabonanedvesség-mérés nemzetközi egységesítésének előmozdításán dolgozunk, amelyhez jó alapot szolgáltat a legígéretesebb nedvességmérési módszer, amelyet Dr. David B. Funk (United States Department of Agriculture, Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration, Technical Service Division, magyarul: Amerikai Mezőgazdasági Minisztérium, Gabonafelügyeleti Hivatal, Technológiai Osztály, továbbiakban: USDA-GIPSA) dolgozott ki. Munkánk lényege a módszer gyakorlati megvalósíthatóságával kapcsolatos kérdések megválaszolása volt. Dolgozatomban az eddig elért eredményekből a tudományos értékkel is rendelkező felismeréseket részletezem.

A gabona nedvességtartalmának ismerete sok esetben nagyon fontos. Egyrészt, ha a gabona nedvességtartalma nem elég alacsony, akkor a tárolás során megromlana, ezért tárolás előtt fontos, hogy a nedvességtartalom ismeretében szárítással beállítsák a megfelelő nedvességet. Másrészt a kereskedelemben ármeghatározó szerepe van. Egyéb minőségi jellemzők mellett, a nedvességtartalom meghatározó tényező az ár kialakításában. A kereskedelemben sokféle műszert használnak, de ezek azonos minta esetén is eltérő eredményeket szolgáltatnak. Mivel a gabonakereskedelemben sok esetben hatalmas gabonamennyiség mérése történik, ezért az eltérésnek igen jelentős anyagi vonzata van. Például, ha egy évnyi kukoricatermést az Egyesült Államokban 1 %-os nedvességmérési hibával mérnék, akkor a veszteség 158 millió dollár lenne (USDA 1996). Ezért különösen fontos, hogy a megbízható, pontos módszereken túl legyen olyan módszer vagy módszerek, amelyek széles körben elterjedtek és egységes nedvességmérési eredményt szolgáltatnak.

A nedvességtartalom meghatározása történhet körülményes és hosszadalmas kémiai labormérésekkel, a gyakorlati életben viszont nagy szükség van gyors és on-line mérési eljárásokra. Kezdetben - egyszerűségük miatt - az elektromos vezetőképességen alapuló berendezések terjedtek el. A módszer akkor szorult ki, amikor a gabonaszárítás elterjedt, és a gabona nedvességtartalma nem volt homogén, ezzel nagyban csökkentve a mérési pontosságot. Ezt a módszert váltotta a kapacitív elven működő nedvességmérés, aminek a lényege, hogy a kondenzátor kapacitása, amely tartalmazza a mérendő mintát, korrelál a nedvességtartalommal. A módszer széles körben elterjedt, a mai napig az egyik meghatározó mérési módszer. A kapacitív mérési módszerrel együtt fejlődik a mikrohullámú mérés technika. Ez különösen sikeres az on-line gabonanedvesség-mérésben, de hordozható vagy kisméretű laborműszer egyelőre nincs, és belátható időn belül nem is várható. Az infravörös technika egy igazi nagy vetélytársa az eddig említett módszereknek pontossága és sokoldalúsága miatt. Az infravörös spektrum nem csak a nedvességtartalomról hordoz információt, hanem egyéb beltartalmi jellemzőkről is. Ezek együttes meghatározása egyetlen méréssel történhet, többváltozós lineáris vagy nemlineáris kalibrációk segítségével, amelyeket a berendezés gyárilag

tartalmaz vagy magunk fejlesztettük. Nagy hátránya, hogy a mérőberendezés drága, ezért nem képes kiváltani a legtöbb területen a dielektromos berendezéseket.

A gabonanedvesség méréstechnikája a majd 60 éves fejlődése alatt sem jutott el arra a szintre, hogy maradéktalanul kielégítse a nemzetközi kereskedelem elvárásait. Egyrészt a műszerek nem elég pontosak, de a nagyobb gondot mégis az okozza, hogy a gabonanedvesség-mérők nem egységesek. A különböző mérési módszerek és műszerek nem adnak megfelelően pontos egyezést azonos minták mérése során. Az eltéréseknek két fő oka van, az egyik, hogy a gyártók különböző gabona mintákat alkalmaznak a kalibrációk fejlesztése során, a másik természetesen az, hogy a mérőcellák és a mérési eljárások különbözők.

Az USA-ban nagy gondot fordítanak arra, hogy a gabonakereskedelem korrekt módon történjen, ennek a célnak a szolgálatában áll a USDA-GIPSA. Az 1990-es években úgy döntöttek, hogy mindent megtesznek azért, hogy előmozdítsák az új, jobb nedvességmérők fejlesztését, és megoldják az egységesség kérdését. Ennek a törekvésnek a keretében a United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, (magyarul: Amerikai Mezőgazdasági Minisztérium Mezőgazdasági Kutató Intézete, továbbiakban USDA-ARS) és az USDA-GIPSA 1998-2003 között kifejlesztettek egy új, rádiófrekvenciás gabonanedvesség-mérő módszert. A módszer elnevezése Very High Frequency - Unified Grain Moisture Algorithm (magyarul: magas frekvenciás egyesített gabonanedvesség-mérő módszer, továbbiakban: VHF-UGMA). A módszer pontosságával és megbízhatóságával felülmúlja a kereskedelemben kapható berendezéseket. A mérési algoritmus - tulajdonságaiból következően - azzal kecsegtetett, hogy a kifejlesztett kalibráció átvihető az azonos elven működő nedvességmérőkre.

A USDA-GIPSA célul tűzte ki a módszer széles körben való elterjesztését, mert ezen a módszeren alapuló berendezések között megoldhatónak tűnt az elfogadható határon belüli egységes gabonamérési eredmény. Ennek érdekében nem védte le szabadalmi joggal a módszert, ellenkezőleg, minden segítséget megad a gyártóknak, hogy saját fejlesztésű berendezést tervezzenek, és a kalibrációt, amelyet a módszer fejlesztése során készítettek, alkalmazzák ezekre az egyedi műszerekre.

A munkánk fő célja az volt, hogy a több ezer mintán készített VHF-UGMA kalibrációt átvigyük a gyakorlati szempontból megfelelőbb tesztcellákra. Ennek érdekében ki kellett választani a lehetséges tesztcella-konstrukciókat. Majd megfelelően hatékony modellezési módot és sztenderdizációs eljárást kellett kidolgozni, hogy a cellák a permittivitást pontosan és egységesen mérjék. Végezetül meg kellett határozni, hogy a gabonaminta hogyan befolyásolhatja a kalibráció átvihetőségét.

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 NEDVESSÉGTARTALOM

A nedvességtartalom értéke százalékosan fejezi ki a gabonában lévő víz mennyiségét. Ezt kétféle módon értelmezik, az egyik a száraz bázisra, a másik a nedves bázisra vonatkoztatott nedvességtartalom. A magyar és az amerikai gyakorlatnak megfelelően dolgozatomban a nedves bázisra vonatkoztatott nedvességet használjuk (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, m_{minta} a minta tömege. A magyar szabvány szerint a nedvességtartalom mértékegysége a $\%(m/m)$, dolgozatomban viszont a nemzetközileg elfogadott mértékegységet a %-ot használom; a nedvességtartalom jelölésére pedig az M-et index nélkül.

2.1.1 A nedvességtartalom mérése

A nedvességtartalom meghatározására vannak közvetlen kémiai módszerek (ICC 1976; ISO 1978), amelyeket referencia módszerekként is használnak, de a gyakorlatban a gabona nedvességének meghatározására a szárítószekrényes mérés a legelterjedtebb referencia módszer. A szárítószekrényes módszereket a kémiai módszereket alapul véve, mint referencia módszerek, fejlesztették ki. A szárítószekrényes mérés lényege, hogy melegítés hatására a gabonában lévő víz távozik, amelynek mennyiségét tömegméréssel határozzák meg. A szárítószekrényes mérés előírásai országról országra változnak, és ezért az eredmények is eltérnek (Multon 1990).

Ezek a módszerek körülményesek és hosszadalmasak, ezért van szükség a gyors módszerekre. Például a gabonaátvevő helyeken legalább egy teherautó megy át percenként, és a folyamatot nem lassíthatja a gabonanedvesség-mérés.

A gyors módszerek általában indirekt módszerek, nem közvetlenül a mérni kívánt vízmennyiséget mérik, hanem egy közbenső fizikai paramétert vagy paramétereket. A mérendő mennyiséget kalibrációs összefüggéssel határozzák meg a mért paraméterből.

A dielektromos elven működő nedvességmérők a gabona dielektromos állandójának mérésén alapulnak, ezért a következőkben ismertetem a gabonák eddig megismert dielektromos tulajdonságait, és ezek dolgozatom szempontjából fontos mérés technikáit.

2.2 PERMITTIVITÁS

2.2.1 Statikus dielektromos állandó

A valós relatív permittivitás (továbbiakban: dielektromos állandó) a szigetelő közegek villamos teret befolyásoló hatására jellemző mennyiség. Ha egy szigetelőanyagot elektromágneses térbe helyezünk, akkor az anyagon belül az elektromos térerősség nagysága csökken:

$$\epsilon_s = \frac{E_{\text{külső}}}{E_{\text{belső}}} \quad (2)$$

ahol ϵ_s a statikus, időben állandó térre vonatkozó dielektromos állandó, $E_{\text{külső}}$ és $E_{\text{belső}}$ az anyagon kívüli, illetve az anyagon belüli elektromos térerősség. Faraday 1837-ben azt tapasztalta, hogy kondenzátor lemezei közé szigetelő anyagot téve, a lemezek között mérhető feszültség csökken. A kapacitások hányadosa a kondenzátor fajtájától és méretétől függetlenül, egyedül az anyagra jellemző mennyiség.

A jelenség oka az anyag polarizálódása. A szigetelőanyag belsejében rendezetlenül elhelyezkedő dipólusok a külső térerősség hatására az elektromos térnek megfelelő irányba elfordulnak. Így a szigetelőanyag térfogategységenként ún. dipólusmomentummal fog rendelkezni, amelynek tere az eredeti térrel ellentétes irányú. Ez az indukált tér a külső elektromos térre szuperponálódva csökkenti annak nagyságát. (von Hippel 1995a)

A polarizáció mértéke függ az anyag polarizálhatóságától, az alkalmazott tér frekvenciájától és erősségétől (Simonyi 1990).

2.2.2 Komplex relatív permittivitás

Ha az elektromos tér időben változik, akkor két jelenséget figyelhetünk meg. Egyrészt az elektromos tér hatására az anyag polarizálódik, másrészt az anyagban veszteség lép fel. Ezeknek a jelenségeknek a mennyiségi jellemzésére vezették be a komplex relatív permittivitást:

$$\epsilon = \epsilon' - j \cdot \epsilon'' \quad (3)$$

ahol ϵ' a relatív permittivitás valós része, a frekvenciafüggő dielektromos állandó, j a képzetes egység, ϵ'' a permittivitás képzetes része, a veszteségi tényező. A valós rész az anyag energiatároló képességét, a dielektromos veszteségtényező pedig az elektromos energia hővé alakulásának a mértékét jellemzi. A képzetes résznek az energia megmaradás törvénye miatt kell negatív előjellel szerepelnie a komplex permittivitásban (Simonyi 1990).

A dielektromos anyag vesztesége történhet az egyenáramú vezetőképesség és a polarizációs veszteség miatt is, így a képzetes rész:

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_{\text{pol}} + \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0} \quad (4)$$

ahol $\varepsilon''_{\text{pol}}$ a polarizációs veszteségi tényező, σ az egyenáramú vezetőképesség, ω az elektromágneses tér körfrekvenciája és ε_0 a vákuum permittivitása (von Hippel 1995a). A permittivitáshoz kapcsolódó mennyiség a veszteségi tangens, amely megadja a permittivitás képzetes és valós részének az arányát:

$$\text{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (5)$$

2.2.2.1 Permittivitás frekvenciafüggése, relaxációs mechanizmusok

A permittivitás frekvenciafüggését a polarizációs mechanizmusok frekvenciafüggése okozza. Négyféle mikroszkopikus polarizáció van. Ezek klasszikus fizikai képpel a következők. Az elektronpolarizáció, amikor a külső elektromos tér hatására az elektronpályák deformálódnak; az atomi polarizáció, amikor poláris molekulák atomjai távolodnak el a tér hatására; az orientációs polarizáció, amikor állandó elektromos dipólussal rendelkező molekulák elfordulnak. Végül, ha az anyag tartalmaz szabad töltéseket, akkor azok a külső tér hatására elmozdulnak, és az anyag határfelületén összegyűlve hoznak létre makroszkopikus polarizációt. Ez az egyetlen polarizáció, amelyet nem kötött, hanem szabad töltések hoznak létre (von Hippel 1995b).

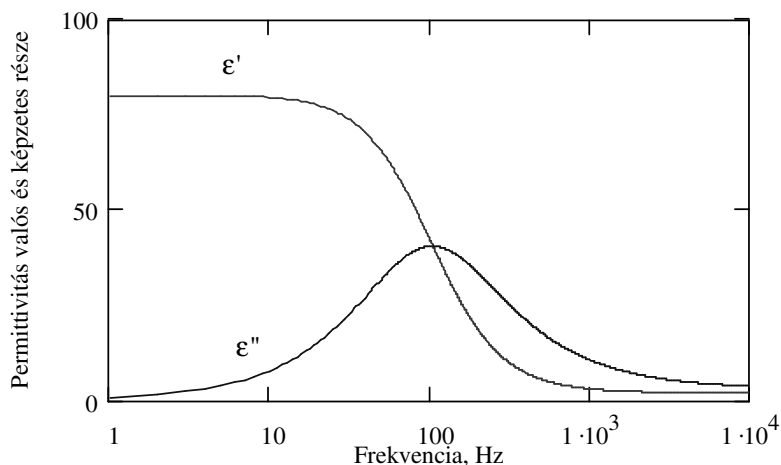
A fenti mechanizmusokat két csoportba lehet osztani: a rezonancia és a relaxációs mechanizmusok. A rezonancia az elektron és az atomi polarizációnál történik. Ezek az ultraibolya, látható és infravörös elektromágneses frekvenciatartományba esnek. A relaxációs mechanizmusokról az állandó dipólusok orientációja és a szabad töltések elmozdulása esetében beszélünk. Ez a két hatás figyelhető meg a dielektromos spektroszkópia frekvencia tartományában az egyenáramtól akár 100 GHz-ig. A relaxációs mechanizmusoknál nincs állandó visszatérítő erő. A tér szerint beállt állandó dipólusmomentumok a külső tér megszűnte után a véletlen hőmozgás miatt, a szabad töltések pedig a saját maguk által keltett elektromos tér miatt rendeződnek vissza.

A relaxációs hatások létrejöttéhez és megszűnéséhez idő kell. A folyamatot jellemző időállandót relaxációs időnek, a reciprokát relaxációs frekvenciának nevezik. Ez az idő befolyásolja az anyag viselkedését a különböző frekvenciájú elektromágneses térben. Statikus térben a térerősség hatására a pozitív és negatív részből álló molekulák elfordulnak, és a tér megszűntéig ez az állapot fennmarad. Alacsony frekvencián a dipólusok együtt forognak a térrel, az anyag a

statikus dielektromos állandó értékét mutatja. A frekvencia növekedtével a forgás egyre lemarad, ezért a dielektromos állandó értéke csökken, viszont a veszteség nő. Ha a külső tér frekvenciája eléri a relaxációs frekvenciát, akkor a veszteség maximális, és a dielektromos állandó a statikus érték és a végtelenbeli érték között van. Nagyobb frekvenciákon a dipólusok egyre jobban lemaradnak a külső tér változásától, ezért hozzájárulásuk a dielektromos állandóhoz a frekvencia növekedtével teljesen megszűnik. Ezt a viselkedést, amit diszperzióknak neveznek, szigetelő anyagokra Debye írta le a következő képlettel (Debye 1929):

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau_r} \quad (6)$$

ahol ω a külső elektromágneses tér körfrekvenciája, j a képzetes egység, τ_r a relaxációs idő, ϵ_s a statikus permittivitás, ϵ_{∞} a permittivitás értéke, amikor már az adott relaxációs mechanizmus nem érvényesül. A fenti képletet szemléletesen a 1. ábra mutatja, amelyen nyomon követhető a fentebb leírt viselkedés a frekvencia függvényében:



1. ábra A permittivitás frekvenciafüggésének szemléltetése a Debye modell alapján

Egy valódi anyag esetében számos relaxációs és rezonancia effektus van jelen, és adódik össze. Statikus esetben az összes mechanizusból eredő hatás adódik össze. A frekvencia növelésével a lassú polarizációs mechanizmusok hatásai rendre elmaradnak, hatásaik a magasabb frekvenciákon nem jelentkeznek.

2.2.3 A víz permittivitása

Az anyagok dielektromos tulajdonságai a frekvencián túl függenek attól is, hogy milyen kémiai környezetben és milyen fizikai fázisban vannak. A dielektromos tulajdonság frekvenciafüggése a tehetetlenségi momentumtól függ. A nem-poláros anyagok kis változást

mutatnak széles frekvencia tartományban, de a vízre gyakorolt kémiai hatás miatt lényeges hatásuk van a víz dielektromos tulajdonságaira. Ha a vízmolekula kötődik más molekulákhoz, akkor a forgási tehetetlenségi nyomatéka növekszik, és attól függően, hogy milyen erős a kötés, és mekkora a másik molekula tehetetlenségi nyomatéka, annak mértékében változik meg a rezonanciafrekvencia (Hasted 1973a).

2.2.3.1 Gabonában lévő víz

A gabona dielektromos állandóját a nedvesség mennyiségén kívül annak kötési módja is meghatározza. A víz alapvetően két formában lehet a gabonában: szabad és kötött víz. A szabad víz az, amely fizikailag abszorbeált a kapillárisokban és üregekben, kötött víz, amely kémiaiilag kötődik különböző kötési energiával. A szabad és kötött víz definíciója nem egységes, például vannak, akik ezt a kötési energiák szempontjából tekintik (Multon 1990).

A vízmolekula a gabonában kötődhet másik vízmolekulához vagy egyéb más molekulához. A molekulák más-más kötődési lehetőségeket adnak, így különböző kötési konfigurációk alakulnak ki. Minden különböző kötési forma különböző relaxációs frekvenciafüggő hatást okoz. A gabonában lévő víznek a frekvenciafüggő permittivitása a sokféle kötésből adódó hatás összege, abban a mértékben, amilyen arányban jelen vannak az adott gabonában (Hasted 1973b). Ez az egyik fő oka, hogy gabonafajonként különböző nedvességmérési kalibrációs összefüggésre van szükség (Funk 2001).

2.2.4 Szemcsés anyagok permittivitása

A szigetelő anyag szemcsézettsége megváltoztatja az anyag mérések során mutatott dielektromos tulajdonságait. Ennek az az oka, hogy a szemcsézetség miatt a szemcsék között levegő van, ezért ez egy "új anyag", ami levegő és a szemcsék keveréke (Hasted 1973c). Ha a szemcsék nagysága sokkal kisebb, mint a hullámhossz, akkor az anyag homogénnek tekinthető, amely jellemezhető az úgynevezett effektív permittivitással (Sihvola et al. 1988). A keverékek permittivitása függ a szemcsék méretétől, formájától és a térkitöltéstől.

Az irodalomban sokan foglalkoznak különböző keverékek dielektromos állandójának analitikus és numerikus számolásával. A numerikus számításokhoz általában végeselemes módszereket használnak, és eredményül egy adott minta dielektromos állandóját kapják (Karkkainen et al. 2000). Az analitikus számolások során valamilyen egyszerűsítő közelítéssel határoznak meg összefüggéseket a térkitöltés és a keverék komponenseinek dielektromos tulajdonságai között. Ezek a képletek meghatározott típusú keverékekre, adott feltételek mellett adnak jó leírást. Ezek a számolások és becslések különösen fontosak a mikrohullámú kezelési technológiák fejlesztése során, amikor fontos tudni, hogy mennyi energiára van szükség a

melegítéshez; másrészt a dielektromos mérés technikánál, hogy a mérendő anyag dielektromos állandója értelmezhető legyen (Nelson 1991).

2.2.4.1 Legfontosabb összefüggések

Amikor két vagy több dielektromos anyagot összekevernek, akkor a keverék dielektromos állandója valahol a legnagyobb és a legkisebb dielektromos állandójú komponens dielektromos állandója között van (Hasted 1973c). A keverék dielektromos állandója függ az összetevők térkitöltésétől, formájától és orientációjától. Két szélsőséges eset van: az egyik a párhuzamos fonalak, amelyek merőlegesek a lemezekre (7), a másik a lemezekkel párhuzamos lapok (8):

$$\epsilon_m = \epsilon_0 \cdot (1 - v_i) + v_i \cdot \epsilon_i \quad (7)$$

$$\frac{1}{\epsilon_m} = \frac{v_i}{\epsilon_i} + \frac{1 - v_i}{\epsilon_0} \quad (8)$$

ahol ϵ_m a keverék dielektromos állandója, ϵ_i az anyag dielektromos állandója, ϵ_0 a közeg dielektromos állandója, v_i az anyag relatív térkitöltése:

$$v_i + v_0 = 1 \quad (9)$$

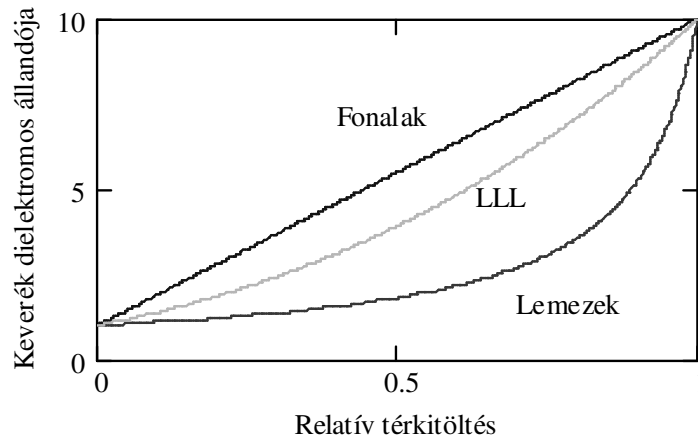
ahol v_i az anyag és v_0 a közeg relatív térkitöltése.

Gömb alakú szemcsékre homogén közegben a Burgermann és Böttcher képlet ad összefüggést. A formai különbség ellenére nagyon hasonló eredményt adnak. Ezek nagyon speciális feltételekkel vezették le, ennek ellenére sok alkalmazási területen jól működnek (Van Beek 1965). Looyenga jóval általánosabb módon vezette le a róla elnevezet összefüggést, amely folytonos dielektrikumban lévő anyagra felírt differenciálegyenlet partikuláris megoldása. Az eredményeit üveggolyókkal igazolta, amelyeket szén-tetrakloridban helyezett el. Mivel a származtatásban nem játszik szerepet a részecskék formája, ezért alkalmazható mindenféle részecskére. Mivel ezt a levezetést Landau és Lifshitz (1960) is függetlenül elvégezte, ezért ezt a keverékformulát Landau-Lifshitz-Looyenga keverékformulának nevezik* (Looyenga 1965). Továbbiakban LLL keverékformula.

* Az eredeti Landau és Lifshitz publikáció valószínűleg 1956-ban jelent meg oroszul, majd 1960-ban angolul (Landau et al.). 1970-es évektől LLL keverékformula megnevezéssel jelenik meg a szakirodalomban, ezért munkában én is így használom.

$$\varepsilon_m^{\frac{1}{3}} = (1 - v_i) \cdot \varepsilon_0^{\frac{1}{3}} + v_i \cdot \varepsilon_i^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

A (7), (8) és (10) képletek működését a következő ábra szemlélteti:



2. ábra Három fontos keverékformula viselkedésének szemléltetése

Érdekes meglátás, hogy ezek az összefüggések a Birchark modell (11) alapján is felírhatók (Hilhorst 1998):

$$(\varepsilon_m)^\alpha = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^\alpha \cdot v_i \quad (11)$$

ahol ε_m a keverék dielektromos állandója, ε_i az egyes komponensek dielektromos állandója, n a komponensek száma, v_i a komponens fajlagos térfogata. A (7) egyenlet esetében $\alpha=1$, (8) egyenlet esetében $\alpha=-1$ és az LLL összefüggés estében $\alpha=1/3$. Ez nem jelenti, hogy minden keverékformula felírható így, de a Birchark modell alapján az α változtatásával keverékformulákat lehet előállítani, amelyeket a gyakorlatban tesztelni lehet.

Ellipszoidokra is vannak összefüggések, amelyek figyelembe veszik, hogy az ellipszoidok fő tengelye irányában a legnagyobb a tér, ebben az irányban csökkentik legjobban a teret. Számos alakot és a rendeződés fokát is figyelembe vevő összefüggés létezik (Tinga et al. 1973a; Sihvola et al. 1988; Jones et al. 2000), de ezek már igen bonyolultak, használatuk a gabonanedvesség-mérés során nehézkesnek bizonyulna.

2.2.5 Vezetési hatások

Az anyag vezetőképessége nem befolyásolja a minta dielektromos állandóját, ha az anyag homogén. Amennyiben a minta nem homogén, az alábbi effektusok befolyásolják a dielektromos állandót.

Maxwell-Wagner effektus akkor jelentkezik, amikor egy szemcsés vezető anyag nem vezető közegben van. A térerősség hatására a szabad töltések a szemcsében elmozdulnak, és a határfelületen felhalmozódva, dipólusmomentumként viselkednek, ezzel csökkentve az eredő elektromos teret és az effektív dielektromos állandót. Az effektus frekvenciafüggése megegyezik a dipólus relaxáció frekvenciafüggésével. A relaxációs idő növekszik a csökkenő vezetőképességgel (Hasted 1973a; von Hippel 1995b).

Az elektród polarizációnál a töltések az elektródákhoz vándorolnak és halmozódnak fel, ezzel csökkentve az elektromos teret. Ez a jelenség az egyenáramtól a kHz-es frekvencia tartományig jelentkezik, és jóval nagyobb a hatása, mint az igazi dielektromos állandónak (Foster et al. 1989; Kuang et al. 1998).

2.3 GABONA DIELEKTROMOS TULAJDONSÁGAI

A gabona dielektromos tulajdonságainak ismerete elengedhetetlenül fontos a nedvességmérés fejlesztéséhez. Egyrészt ismerni kell, hogy a gabona dielektromos tulajdonsága hogyan változik a nedvességtartalom függvényében, másrészt ismerni kell a mérést befolyásoló tényezőket és ezek természetét.

A gabona dielektromos tulajdonságai nem vezethetők le matematikailag, ami nem meglepő egy összetett mezőgazdasági termény esetén. A nedvesség meghatározása kalibrációs összefüggés segítségével történik, amely vagy a mért elektromágneses jellemző és a nedvességtartalom, vagy a permittivitás és a nedvességtartalom között teremt kapcsolatot.

A gabonák dielektromos tulajdonságait több tényező befolyásolja. A legmeghatározóbb a nedvességtartalom, ezért lehetséges a nedvességtartalom meghatározása a dielektromos tulajdonságok alapján. A további tényezők a nedvességmérést zavaró hatások közé sorolhatók. Ezek közül a legmeghatározóbb a halmazsűrűség és a hőmérséklet (Nelson 1981; Sembery 2002), továbbá a gabonaszemek egyenetlen nedvességtartalma, a gabonahalmaz egyenetlen nedvességtartalma, felületi nedvesség, szennyeződés, törött szemek, évjárat, termőhely és természetesen a fajta (Hemeda et al. 1982; Hurburgh et al. 1986; Gillay et al. 2006).

2.3.1 Nedvességtartalom

A gabonák dielektromos tulajdonságainak nedvességfüggését sokan kutatták, és sok összefoglaló cikk található (Tinga et al. 1973b; Nelson 1991; Lawrence et al. 1998a; Nelson et al.

2000; Sembery 2002). A kutatások azt mutatták, hogy adott frekvencián a dielektromos állandó növekszik a gabona nedvességének növekedésével. A veszteségi tényező és a veszteségi szög tangensének értéke nőhet és csökkenhet is a nedvesség függvényében. Funk (2001) azt találta, hogy a sűrűségkorrigált dielektromos állandó és a nedvességtartalom közti összefüggés a 150 MHz körüli tartományban közelíti meg a lineárist a legtöbb gabonafajtára.

A szórásokat tekintve egyértelműen a dielektromos állandó adódott a legalkalmasabbnak a szemes termények nedvességtartalom mérésére, mivel sokkal kisebb varianciát mutat, mint a veszteségi tényező. Ez a variancia viszont nagy nedvességtartalmú anyagok esetében megnő, a dielektromos nedvességmérés nedvesebb mintán jóval bizonytalanabb, mint a szárazabb anyagok esetén.

2.3.2 Frekvencia

A nagyon alacsony frekvenciákon a dielektromos állandó az elektród polarizáció miatt jóval nagyobb értéket mutat, mint ami a molekulák bipoláris orientációjából adódna (Nelson et al. 1976). Ez a legfontosabb effektus, amely az alacsony frekvenciájú tartományban hat. Ezért ebben a tartományban nem érdemes nedvességtartalmat mérni, mert a gabona vezetőképességének változatosságából eredő szórás nem teszi lehetővé a pontos mérést.

A kHz-es tartományban a Maxwell-Wagner hatás okoz nedvességmérési bizonytalanságot. 100 MHz feletti tartományban a dielektromos állandó varianciája mindegyik frekvenciánál közel azonos (Funk 2001; Sembery 2002), mert a vezetési hatások már nem érvényesülnek. A mikrohullámú tartományokban egyáltalán nem jelentkezik a vezetőképesség hatása, ezen a frekvencián csak a kötött víznek van hatása a dielektromos állandóra, ezért ez a tartomány kedvező a nem nagyon nedves gabonák nedvességmérésére.

2.3.3 Halmazsűrűség

A nedvességmérést legjobban a minta halmazsűrűsége befolyásolja. A halmazsűrűség betöltésről betöltésre változik, továbbá a különböző betöltések különböző sűrűséget eredményeznek, de a rázás és a nyomás is változtatja (Nelson 1981; Gillay et al. 2002; Trabelsi et al. 2007a). A gabonahalmaz sűrűsége függ a mag alakjától, a mag nagyságától, felületének egyenletességétől és a tesztcella méretétől és formájától (Hlynka et al. 1959).

A dielektromos elven működő nedvességmérő berendezések mérési eredménye az adott térfogatban lévő víz mennyiségétől függenek, ezzel szemben a gabona-nedvességtartalom definíciója tömegalapú. Egy közepes értékhez képest a nedves gabona tömege jellemzően 20%-ot változik. Ezért a nedvességmérők legtöbbször valamilyen korrekciót alkalmaznak; a sűrűséget mérni, és valamilyen módon korrigálni kell. A korrekciók ellenére a nedvességmérők rendszeres hibát adnak

a minták közötti sűrűségkülönbség miatt. A dielektromos elven működő berendezések állandó térfogatú vagy állandó tömegű mintát mérnek. A „térfogatos” nedvességtartalom-mérők állandó térfogatú gabonát használnak, és nem veszik figyelembe az azonos típusú gabonaminták sűrűségkülönbségeit (Funk 1990; Funk 1999).

A dielektromos tulajdonságok és a térkitöltés között egyértelmű összefüggést nehéz megállapítani (Sembery 2002). Nelson (1983) vizsgálta számos keverék formula hatékonyságát egész és őrölt mintára, különböző tömörödöttségre. Azt találta, hogy a két legalkalmasabb egyenlet a komplex reflektív egyenlet (11 képlet $\alpha=2$) és az LLL egyenlet. Nelson szerint a gabonákra az LLL adja a legjobb egyezést a mérési eredményekkel.

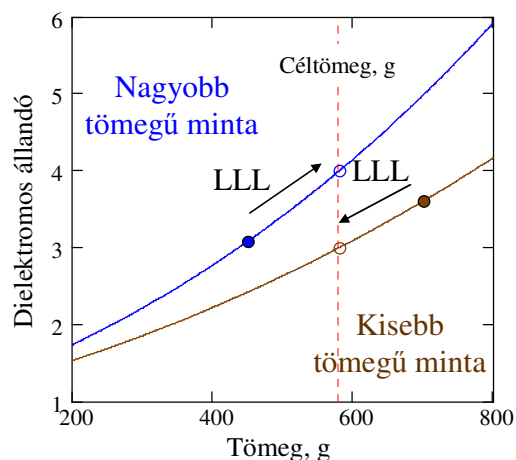
Az LLL keverékformulát továbbfejlesztette, és megállapította, hogy amennyiben a keverék levegő és szilárd granulátum keveréke, akkor a keverék dielektromos állandója számolható egy tetszőleges ismert sűrűségű keverékből (Nelson 1983; Nelson 1992; Nelson 2005). Ez a nagyon lényeges egyenlet úgy jön ki, hogy két különböző keverékre felírt LLL egyenletekből kiküszöböljük a gabona dielektromos állandóját, így kapunk egy egyenletet, amely a két keverék dielektromos állandóját és a két sűrűséget tartalmazza, mint változókat. Kifejezve az egyik keverék dielektromos állandóját megkapjuk az LLL sűrűségkorrekciót, amellyel számolható egy adott sűrűséghez tartozó dielektromos állandó a minta sűrűségéből és dielektromos állandójából:

$$\varepsilon_2 = \left[\left(\varepsilon_1^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} + 1 \right]^3 \quad (12)$$

ahol ε_2 - a transzformált dielektromos állandó, ε_1 a mért dielektromos állandó, ρ_2 célsűrűség, ρ_1 a mért sűrűség.

Funk (2001) felismerte, hogy ennek nagy jelentősége van a gabonanedvesség-mérésben. Felismerte, hogy a sűrűségkorrekció jelentősen csökkenti a dielektromos állandó szórását a nedvességtartalom függvényében, és a dielektromos állandó és a nedvességtartalom közötti összefüggés közel lineárisává válik. Azt találta, hogy a köbös sűrűségkorrekció hatékonyan csökkenti a nedvesség különbségből és a betöltés sebességének változásából adódó hibát. Funk vizsgált más félempirikus összefüggést (11), a kitevő nagyságát vizsgálta (α), és azt találta, hogy a három körüli érték adja a legkisebb varianciát.

A sűrűségkorrekció normalizáló hatása a 3. ábrán látható. A két görbe különböző dielektromos állandójú anyag és levegő keverékének dielektromos állandóját mutatja a minta lehetséges tömegének függvényében. Az LLL-sűrűségkorrekció becsüli, hogy mennyi lenne a keverék dielektromos állandója egy előre definiált sűrűsége.



3. ábra Az LLL-sűrűségkorrekció hatásának szemléltetése

A 3. ábra az LLL-sűrűségkorrekció hatásának szemléltetése egy olyan esetre, amikor két minta tömege nagyon eltér úgy, hogy az egyik tömege nagyobb (barna) a másiké kisebb (kék) mint a céltömeg. Ebben az esetben látható, hogy a barna színnel jelölt minta dielektromos állandója nagyobb, mint a kék színnel jelölt, viszont a céltömegre transzformálás után ez megfordul. Hasonló az eset nedves és száraz minta esetén. A száraz minta tömege jelentősen nagyobb, mint a nedvesé, ezért a sűrűségkorrekcióval megváltozik a dielektromos állandójuk viszonya.

2.3.3.1 Sűrűségfüggetlen kalibrációk

Kutatások folynak a mikrohullámú tartományú méréseknél, hogy ún. sűrűségfüggetlen mérési módszert fejlesszenek ki. A módszer azon alapul, hogy a mért dielektromos állandóból és a veszteségi tényezőtől egy új változót vezetnek be, ami jól korrelál a nedvességtartalommal anélkül, hogy ismernénk a minta sűrűségét. Több sűrűségfüggetlen módszert sikerült kidolgozni nagyon jó hatékonysággal (Kraszewski et al. 1998; Trabelsi et al. 1998). Ezek közül kiemelkedik egy igen új eredmény. A következő képlet (13) egy olyan sűrűségfüggetlen paramétert mutat, amellyel sikerült egyesített lineáris kalibrációt (14) alkotni egy gabonafaj-függő paraméterrel (a_f) (Trabelsi et al. 2007b)

$$\Psi = \sqrt{\frac{\varepsilon''}{\varepsilon' \cdot (a_f \cdot \varepsilon' + \varepsilon'')}} \quad (13)$$

ahol ψ a sűrűség független paraméter, a_f a gabonafajonkénti egyesítő paraméter.

$$M = a \cdot \Psi + b \quad (14)$$

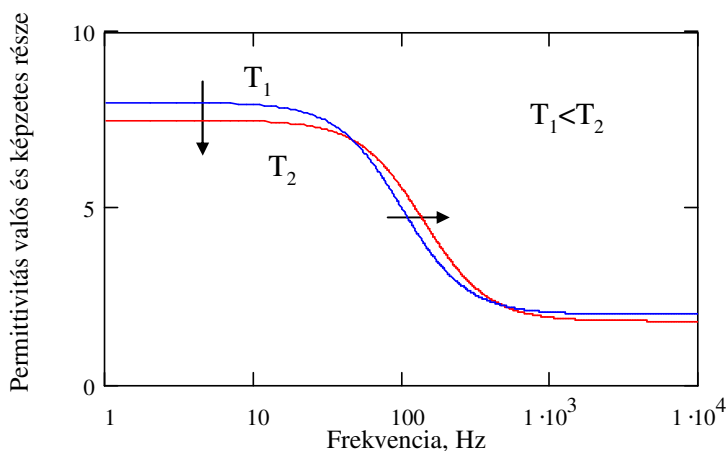
ahol M a nedvességtartalom, a és b az egyesített lineáris kalibráció paraméterei.

2.3.3.2 Betöltés és cella kialakítás

A betöltéssel és tesztcella mérettel kapcsolatban kevés publikációt közöltek. Egyedül Matthew (1963) közölt kifejezetten tesztcella mérettel és betöltéssel kapcsolatos eredményeket. Kapacitív típusú tesztcellák vizsgálata során megállapította, hogy a koaxiális tesztcellában a nem egyenletes téreloszlás miatt nagyobb volt a variabilitás. A betöltési sebesség befolyásolta a gabonahalmaz sűrűségét. Betöltő garattal nem tapasztalt igazi javulást a kézi betöltéshez képest a variabilitásban. Arról nem számolt be, hogy tapasztalt-e eltérést a különböző betöltésekkel kapott nedvességtartalom értékek között.

2.3.4 Hőmérséklet

A hőmérséklet változása egyrészt változtatja a statikus dielektromos állandó nagyságát, másrészt a relaxációs frekvenciát. Ezért a poláris diszperzió tartományában a dielektromos állandó nő a hőmérséklettel, míg ϵ tartományon kívül csökken, a magasabb frekvenciákon a hőmérsékleti tényező kisebb, és egyre közelíti a lineárist (Sembery 2002). A 4. ábra egy egyszerű relaxáció hőmérsékletfüggését szemlélteti a frekvencia függvényében (Hasted 1973a).



4. ábra A dielektromos állandó hőmérsékletfüggésének szemléltetése a frekvencia függvényében

A nedvességtartalom is befolyásolja a hőmérsékletfüggést, míg alacsonyabb nedvességtartalomnál a hőmérsékletfüggés lineáris, addig magasabb nedvességnél exponenciális (Sembery 2002).

A MHz-es tartományban a jellemzően szükséges korrekció 1°C-os eltérésnél 0,1%, de az optimális hőmérsékletkorrekciós együttható függ a gabona típusától, a nedvességtartalomtól és a mérőfrekvenciától (Mészáros 2003, Mészáros 2005b). Az optimális hőmérsékletkorrekciós függvény meghatározása az egyik legnagyobb kihívás a gabonanedvesség-mérők kalibrációjában (Funk 2001). Ezekből az adatokból látható, hogy körülbelül 5°C-os hőmérséklet különbség, ami

könnyen előfordul a gyakorlatban, az már 0,5%-os hibát okozhat, ha a nedvességmérőben nincs hőmérsékletkorrekció.

2.4 PERMITTIVITÁS- ÉS NEDVESSÉGMÉRÉS

A gabona tulajdonságainak ismertetése után összefoglalom az alkalmazható és alkalmazott módszereket, amelyek lehetőséget adnak a gabona dielektromos tulajdonságainak, illetve nedvességének a mérésére.

Különböző frekvenciatartományokban az elektromágneses hullám tulajdonságai miatt alapvetően különböző mérési elveken alapuló mérőeszközöket, cellákat és modelleket kell használni (von Hippel 1954; Nyfors et al. 1989; Sembery 2002). Ezért a módszereket a frekvencia tartományok szerint csoportosítva foglaltam össze. Az egyenáramú vezetőképességből kiindulva, a rádiófrekvenciás kapacitív, VHF (magasfrekvenciás) és mikrohullámú módszereket tekintjük át.

Munkám során maga a mérőműszer vagy mérőáramkör nem volt a fejlesztésünk középpontjában, ezért az irodalmi áttekintésben ezek elméleti háttérének részletezésétől eltekintek. Fontos viszont az alkalmazott cellák, a permittivitás meghatározásához használt modellek és a nedvesség kalibrációs összefüggések részletezése.

Nem foglalkozunk külön az időtartomány reflektometriával (TDR), melynek lényege, hogy a bemenő hullám egy lépésfüggvény, és a visszavert hullámot időben vizsgálják, amiből meghatározhatók az anyagvastagság és dielektromos tulajdonságok is. Bár ez a módszer egyre jobban terjed és igen érdekes, de az ára miatt, mint gyakorlati gabona nedvesség mérési módszer jelenleg nem jön szóba.

2.4.1 Vezetőképességen alapuló módszerek

A vezetőképességen alapuló módszerek azt használják ki, hogy a gabona nedvességtartalma és az egyenáram logaritmusai között megközelítőleg lineáris összefüggés van (Briggs 1908). Ezen az elven működő nedvességmérők olcsók, de pontatlanok. Ennek az egyik oka, hogy ez a mérési elv nem érzékeny a kötött vízre (Hunt et al. 1966), továbbá érzékeny a gabonanedvesség egyenetlen eloszlására (Hunt et al. 1972). Az utóbbi csökkentése érdekében legtöbbször a mintát meg kell darálni a mérés előtt. Amikor a gabonaszárítás a gyakorlatban elterjedt, akkor az ezen az elven alapuló berendezések teljesen kimentek a divatból (Waterloo 1980).

2.4.2 Kapacitív mérések elmélete

A kapacitív mérés technika lényege, hogy a tesztcella kapacitása változik a gabona nedvesség függvényében. A kapacitás definíciója:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (15)$$

ahol a Q a kondenzátor lemezein felhalmozódott töltés, U a kondenzátor lemezeire kapcsolt egyenáramú feszültség. Egy szigetelő anyagot tartalmazó kondenzátor kapacitását megközelítőleg a következő összefüggés adja meg.

$$C = C_0 \cdot \varepsilon' \quad (16)$$

Ahol a C_0 az üres kondenzátor kapacitása. A képlet csak végtelen nagy kondenzátor esetében igaz. A lemezek szélén az elektromos tér az anyagon kívül is jelen van, így a kapacitás a dielektromos állandó függvényében nem lineáris. Ez a jelenség peremhatásként ismeretes. A (16) képlet helyett az adott tesztcellára jellemző összefüggést határoznak meg (Nelson et al. 1953; Jorgensen et al. 1970).

A mérések során nem egyenáramot használnak, mert ebben az esetben az elektród polarizáció meghamisítaná a mérést, hanem váltakozó áramú feszültséget:

$$U(t) = U \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (17)$$

Az ennek hatására folyó áram kondenzátor esetén:

$$I_c = \frac{dQ}{dt} \quad (18)$$

A (18) egyenletbe a (15), (16) és (17)-et helyettesítve az áram tökéletes szigetelő anyagon szinuszos feszültség esetén:

$$I_c(t) = j \cdot \omega \cdot \varepsilon' \cdot C_0 \cdot U(t) \quad (19)$$

Figyelembe véve, hogy a cellában lévő anyag nem tökéletes szigetelő, tehát a permittivitás komplex, így az áram a következőképp írható:

$$I(t) = j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot (\varepsilon' - j \cdot \varepsilon'') \cdot U(t) \quad (20)$$

Ha a mintát mint egy ideális kondenzátor és egy ohmos ellenállás párhuzamos kapcsolásaként tekintjük akkor:

$$Y = G + j \cdot \omega \cdot C \quad (21)$$

ahol Y a komplex admittancia, G az ohmos vezetőképesség. Az Ohm törvény szerint:

$$I(t) = Y \cdot U(t) \quad (22)$$

A (20), (21) és (22) egyenleteket egybevetve kapjuk, hogy a mért komplex admittancia valós és képzetes részének ismeretében számolható a mért anyag dielektromos állandója és a veszteségi tényezője (von Hippel 1995a):

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad \varepsilon'' = \frac{G}{C_0 \cdot \omega} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{G}{C \cdot \omega} \quad (23)$$

ahol ε'' az egyenáramú vezetőképességből adódó veszteség és a polarizációs veszteség összege.

2.4.3 Kapacitív mérés technika

A gyakorlati nedvességmérésben ezt a módszert alkalmazzák különböző kialakítású és méretű tesztcellákkal. Az alacsony frekvencia miatt a mérés kialakítása egyszerűbb a magasfrekvenciás mérésekhez képest.

A lineáris kalibráció megfelelő eredményt ad, és általában ezt alkalmazzák a gyakorlati nedvességmérőkben (Nelson et al. 1953; Jones 1978; Babb et al. 1989). A kutatások során vizsgálták a több frekvencián mért értékekből készült többváltozós kalibrációt (Lawrence et al. 1998c), és a komplex permittivitásból számolt paraméterekkel sűrűségfüggetlen kalibrációkat is fejlesztettek (Lawrence et al. 1993).

A módszer fő hátránya, hogy az alkalmazott frekvenciatartományban a Maxwell-Wagner relaxáció jelentős mérési bizonytalanságot okoz (Funk 1990; Funk 1998; Gillay et al. 2002).

2.4.4 VHF és mikrohullámú mérések elmélete

A VHF és mikrohullámú rendszerek összefüggései a klasszikus elektromágnesesség axiómáinak számító Maxwell egyenletekből vezethető le. A Maxwell egyenletek szinuszos elektromágneses térre felírt egyenletei:

$$\operatorname{rot} H = J + j\omega D = j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E \quad (24)$$

$$\operatorname{rot} E = -j \cdot \omega \cdot B = -j \cdot \omega \cdot \mu \cdot H \quad (25)$$

ahol H a mágneses térerősség, J az áramsűrűség, D az elektromos eltolás, B a mágneses indukció, μ a mágneses permeabilitás. A (24) és (25) egyenletekből kapható a Laplace időfüggetlen hullámegyenlet:

$$\nabla^2 E + \gamma^2 E = 0 \quad (26)$$

aminek hullámmegoldása:

$$E(z) = E_0 \cdot e^{-j \cdot \gamma \cdot z} \quad (27)$$

ahol γ a terjedési állandó. A terjedési állandó gyökösen függ a komplex permittivitástól:

$$\gamma = \omega \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon} \quad (28)$$

ahol μ_0 a vákuum permeabilitása. Nem mágneses anyagok esetén az anyag permeabilitása megegyezik a vákuum permeabilitásával.

Mivel a fény sebessége

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \quad (29)$$

a terjedési együttható a következőképpen írható:

$$\gamma = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon} = \alpha + j \cdot \beta \quad (30)$$

ahol α a csillapítási tényező, β a terjedési együttható képzetes része. Ezek a fenti képletek segítségével az alábbi módon függnek a permittivitástól:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\epsilon''^2}{\epsilon'^2}} - 1 \right)} \quad \beta = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\epsilon''^2}{\epsilon'^2}} + 1 \right)} \quad (31)$$

Ha az anyagba behatolt hullám áthalad egy z szélességű mintán, akkor a transzmissziós tényező definíciója:

$$T(z) = \frac{E(z)}{E(0)} \quad (32)$$

(27) felhasználásával a komplex transzmissziós tényező és a terjedési tényező közötti összefüggés:

$$T(z) = e^{-\gamma \cdot z} \quad (33)$$

Így ha ismerjük a mintába belépő és kilépő hullám komplex transzmissziós tényezőjét, akkor a terjedési tényezőt keresztül számolható az anyag komplex permittivitása a (31) képletekkel.

A mérést nehezíti, hogy az elektromágneses hullám dielektromos anyag határfelületén részben visszaverődik, és részben behatol az anyagba. A visszaverődő hullám reflexiós tényezőjét az alábbi módon definiálják:

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_0} \quad (34)$$

ahol E_0 a beeső hullám, E_r a visszavert hullám komplex amplitúdója. A reflexiós tényező egy komplex szám. Fizikai jelentése a komplex reflexiós tényező abszolút értékének és fázisszögének van. Az abszolút értéke a visszavert hullám amplitúdójának az aránya a beérkező hullám amplitúdójához viszonyítva (továbbiakban: reflexiós tényező nagysága). A fázisszög pedig a kilépő és belépő hullám fázisának különbsége (továbbiakban: reflexiós tényező fázisa) (Simonyi 1990).

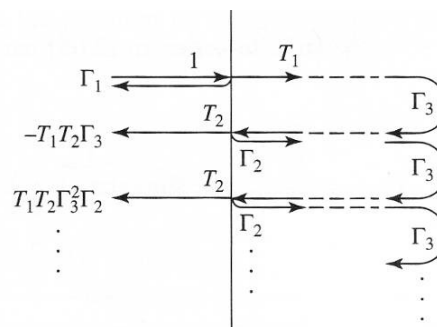
Ha a beeső hullám egy ϵ_1 dielektromos állandójú közegből esik egy ϵ_2 dielektromos állandójú közeg határfelületére, akkor a határfelületről visszavert hullám reflexiós tényezője a következő (Stratton 1941):

$$\Gamma = \frac{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_2}} - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_2}} + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1}}} \quad (35)$$

A határfelület komplex transzmissziós tényezője:

$$T = 1 + \Gamma \quad (36)$$

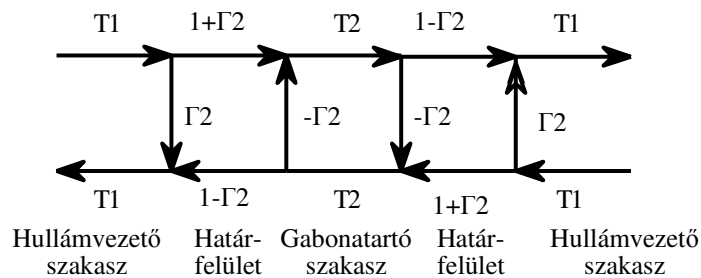
A hullám nem csak az anyagba belépve reflektálódik, hanem akkor is, amikor abból kilép, ezért ennek hatására többszörös visszaverődés jön létre (5. ábra).



5. ábra A mintán történő többszörös visszaverődés szemléltetése (Pozar 1998)

Az 5. ábrán jól látható, hogy az első határfelületről visszaverődik a hullám egy része (Γ_1), a másik része áthalad a felületen (T_1) és áthalad az anyagon, majd a másik felületen visszaverődik (Γ_3). Ez a hullám megint áthalad az anyagon és az első felülethez érve részben áthalad (T_2), de egy része visszaverődik (Γ_3), és a folyamat a végtelenségig ismétlődik. Ennek a problémának a megoldására több gyakorlati és elméleti megoldás született.

A jelfolyamábrás módszer egy matematikai modellalkotó módszer, amellyel könnyen lehet a reflexiók és a transzmissziók tényezőit számolni a mikrohullámú hálózatokban. Ezt nem tárgyalom részletesen, mert a következőkben bemutatott munkámban nem használom modellépítésre. A módszer lényege, hogy a rendszert szakaszokra bontva ábrázolni kell, amiben a transzmissziókat és a visszaverődéseket nyilakkal és azokhoz tartozó mennyiségekkel kell jelölni, adott szabályok szerint. Ezután két módszert is lehet használni a képletek felírásához. Az egyik módszer, hogy grafikusán egyszerűsítünk, majd adott szabály szerint felírjuk a végső összefüggést (Kuhn 1963). Erre mutat példát a 6. ábra és az ehhez tartozó, továbbiakban bemutatott (39) képlet:



6. ábra Jelfolyamábrás megoldáshoz használt diagram

Egy másik módszer, hogy a felrajzolt ábrán meghatározott hurkokat kell körbejárni, ezzel nagyszámú egyenletről álló egyenletrendszert kapunk, amely leírja az általunk vizsgált rendszert.

A másik módszer az ABCD mátrixos megközelítés, melynek alkalmazására nem találtunk példát a gabona permittivitásának méréstechnikáit tárgyaló irodalomban.

2.4.5 Mikrohullámú mérés technikák

A mikrohullámú tartomány a legmagasabb frekvenciatartomány, amit még dielektromos elmélettel tárgyalnak. A néhány GHz-től a néhány 100 GHz-ig terjedő tartományt foglalja magában. A mikrohullámú mérés technika fontos szerepet játszik az online gabonanedvesség-mérésben, és az élelmiszerek permittivitásának kutatásában a mikrohullámú kezelések miatt. Az alábbiakban a mérési elrendezések szerint foglaltam össze - a teljesség igénye nélkül - néhány fontos módszert.

A szabad tér mérések során tölcserantennákat alkalmaznak, amelyek a mintatartóval nem érintkeznek, a hullám a szabad térben terjed és halad át a mintatartón. A permittivitás a fentebb leírt módokon az α és β mérésével határozható meg. Ha a csillapítás 10 dB, akkor a visszaverődés

elhanyagolható, és ha elég nagy a minta, akkor nincs szóródás. Online méréshez nagyon jó. mert nagy mennyiségű gabona mérhető, könnyen alkalmazható az adott környezethez (Kraszewski 1996a).

Az üregrezonátor egy mérőkamra, amibe a mintát helyezve az üreg rezonancia frekvenciájának eltolódásából lehet a minta permittivitását meghatározni (Bartley et al. 1997).

Csőtápvonalas mérések során a hullám négyszögletű csőben halad és a minta is ebben helyezkedik el. A csőtápvonal lezárása miatt állóhullámok alakulnak ki, amelyeknek értékeiből a dielektromos állandó számolható (Sembery et al. 1999; Sembery et al. 2001).

A mikrohullámú nedvességmérés nagy előnye, hogy érzéketlen a vezetési effektusok zavaró hatására (Hunt et al. 1966; Hasted 1973a; Kraszewski 1996b), pontos mérések végezhetőek, de a mérete miatt nem alkalmazható kisméretű mérőműszerként a gabonanedvesség-mérésben.

2.4.6 VHF mérés technikák

Azok az eszközök és módszerek tartoznak ide, amelyeknél már a kapacitív mérés technika a nagy frekvencia miatt nem jöhet szóba, de még nem mikrohullámú. Ez a tartomány a 100 MHz-től a néhány GHz-ig terjedő tartományt jelenti, ahol a cella méreteinél nagyobb a hullámhossz. Az általunk végzett kutatások ebbe a tartományba esnek. A módszereket a mérési elrendezések szerint csoportosítva foglaltam össze.

2.4.6.1 Nyitott végű koaxiális érzékelő

A nyitott végű koaxiális érzékelőt széles körben használják. A módszer lényege, hogy egy nyitott koaxiális végződésre helyezve a mintát, számolható a minta permittivitása a mért impedanciából. A módszer követelménye, hogy nagyon jó érintkezés legyen a fej és a minta között, ezért folyadékok és sima felületű minták könnyen mérhetőek, de gabonákra ez a módszer nem alkalmazható.

2.4.6.2 Koaxiális cella reflexiós módban

Ennél a módszernél a mintatartó egy koaxiális cella, amibe folyadék és szilárd minták is helyezhetőek. A végződés lehet rövidzár vagy nyitott. Ezeknél a méréseknél már komolyan jelentkezett az eredmények interpretálásának problémája, azaz miként lehet a mérési eredményekből a permittivitást számolni. Az elektromágneses hullám hullámhossza és a cella méretei azonos nagyságrendbe esnek, így a cella minden eleme hatással van a mérésre, főleg az ún. átmeneti szakasz okoz problémát, ahol az elektromágneses hullám részben reflektálódik.

Modellként meglehetősen bonyolultakat is használtak, de egészen egyszerű felépítésűt is, például az ún. invariáns kereszt hányadosok módszerét, amelyet Lawrence (1989) fejlesztett ki:

$$\frac{(Z - Z_1) \cdot (Z_2 - Z_3)}{(Z - Z_3) \cdot (Z_2 - Z_1)} = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{(\varepsilon - \varepsilon_3) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (37)$$

ahol $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ kalibrációs anyagok ismert komplex permittivitásai, Z_1, Z_2, Z_3 a kalibrációs anyagok esetén mért impedanciák (komplex ellenállás), ε az ismeretlen komplex permittivitás, Z a mért impedancia. A cellák kalibrációjához benzolt, alkoholokat és levegőt használtak (LaVerne et al. 1970; Lawrence et al. 1990).

2.4.6.3 Koaxiális tápvonalak

Hasonlóan az előző esethez a mintatartó egy koaxiális elrendezésű cella, de mint egy hullámvezető működik, és ebben helyezkedik el a mérendő minta. Az ilyen típusú cellák esetében lehetséges a reflexiós és a transzmissziós tényező mérése is. A módszert alkalmazták folyadékok, talaj és gabonák permittivitásának mérésére, 8 GHz-ig, ameddig az ilyen méretű tesztcella transzverzális elektromágneses (TEM) módban használható.

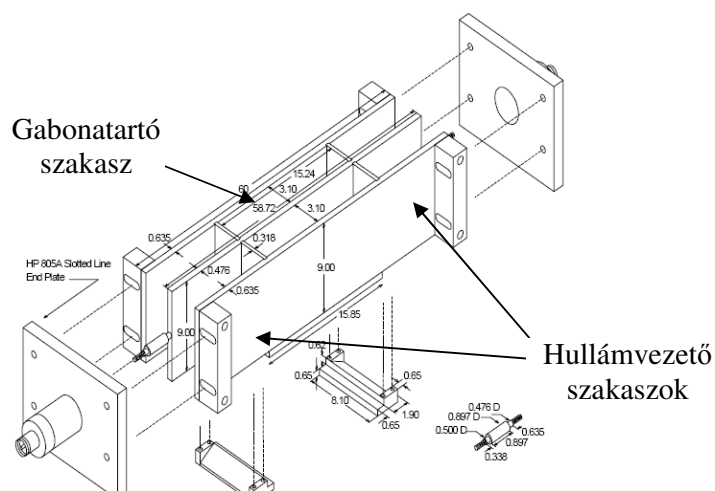
La Verne (1970) egyszerűen a veszteséget számolta a reflexiós és a transzmissziós tényezők, és korreláltatta a nedvességtartalommal. A legtöbbször a permittivitás számításához a jelfolyamátvitel modelljét használták (Lawrence et al. 1989; Lawrence et al. 1990; Chew et al. 1991; Huang 2001; Gorriti et al. 2005).

2.4.6.4 Párhuzamos falú tesztcella

Az irodalom áttekintése során az általunk alkalmazott tesztcellán kívül nem találtam olyan esetet, hogy a VHF tartományban párhuzamos falú tesztcellával mértek volna permittivitást.

2.4.6.5 Az általunk is használt tesztcella

Egy 1995-ben kezdődött kutatási projekt keretében Kurt Lawrence és Stuart Nelson (USDA-ARS (Mezőgazdasági Kutató Központ)) terveztek és építettek egy tápvonal típusú tesztcellát (7. ábra) gabonák széles frekvencia tartománybeli vizsgálatához (1-300 MHz) (Lawrence et al. 1999).



7. ábra: A tesztcella felépítése (Lawrence et al. 1999)

A cella alapját egy a kereskedelemben kapható ún. 805A Slotted Line cella képezte. A gabonaminta egy 15 cm-es szakaszon a tesztcella középső részén helyezkedik el. A mintát alul műanyag lemez tartja a mintatartóban. A gabonatartó szakasz előtti és utáni szakaszok az ún. hullámvezető szakaszok, amelyek kb. 22 cm hosszúak. A cella illesztett 50 Ω-os lezárású. A lemeztávolság 3,1 cm, a távolság beállítása a reflexiók tényező minimalizálásával történt.

Kezdetben a nedvességtartalom mérésére a komplex reflexiók tényezőkből alkotott többváltozós kalibrációt alkalmaztak.

$$M = A_0 + A_1 \cdot (\Gamma_v)_1 + A_2 \cdot (\Gamma_i)_{41} + A_3 \cdot (\Gamma_i)_{141} + \frac{A_4}{W} \quad (38)$$

ahol M a nedvességtartalom, A_0 , A_1 , A_2 , A_3 és A_4 a kalibráció méréssel meghatározható együtthatói, W a minta tömege, Γ_v és Γ_i a reflexiók tényező valós illetve képzetes része, az indexben MHz-ben megjelenő frekvencián. A módszer pontos volt, de gyakorlatban alkalmazott mérőműszer esetén nem jó, ha több frekvencián kell mérni.

Ahhoz, hogy tanulmányozni lehessen a gabonák dielektromos tulajdonságait, és egy frekvenciát használó hatékony nedvességmérő berendezést lehessen fejleszteni, megalkották a cella egyszerű dielektromos modelljét (Funk 2001). A jelfolyamábrás modell alkotásához a hullámvezető szakaszokat és a gabonatartó szakaszt vették csak figyelembe. A jelfolyamábrás megoldáshoz a 6. ábrát használták. Az egyszerűsítés után kapott összefüggés:

$$\Gamma = e^{-j \cdot 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \cdot d_0} \cdot \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{ef}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{ef}}} \cdot \frac{1 - e^{-j \cdot 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \cdot d_g \cdot \sqrt{\epsilon_{ef}}}}{1 - \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{ef}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{ef}}} \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \cdot d_g \cdot \sqrt{\epsilon_{ef}}}} \quad (39)$$

ahol Γ - a mért reflexiós tényező, f – a mérőfrekvencia, d_0 - a hullámvezető szakasz hossza, d_g - a gabonával töltött szakasz hossza, c - a fénysebesség, ϵ_{ef} - a gabona effektív komplex permittivitása.

A modell a dielektromos állandót implicit tartalmazza, ami analitikusan nem fejezhető ki, ezért csak iteratív módon számolható. A modell által szolgáltatott dielektromos állandó az ún. effektív dielektromos állandó. Lineáris transzformációval lehet a gabonahalmaz dielektromos állandóját megkapni

$$\epsilon = (\epsilon_{ef} - \text{corr} - 1) \cdot \text{em} + 1 \quad (40)$$

ahol ϵ a gabona permittivitása, ϵ_{ef} - gabona effektív permittivitása, corr az ürescella-korrekción és em a kitöltési tényező.

A modell paramétereit kalibrációval határozták meg. A kalibrációval meghatározott paraméterek a d_0 , em és corr voltak. A d_0 elvileg a hullámvezető szakasz hossza, de a modell működéséhez ezt az értéket a mérések alapján meg kellett változtatni. A d_g a gabonatartó szakasz hossza a geometriai hossz volt. A dielektromos kalibrációhoz alkoholokat használtak: metanolt, propanolt, butanolt, hexanolt és dekanolt. Az alkoholok elméleti permittivitása számolható, és így referencia anyagként szolgált a tesztcella paramétereinek meghatározásához. A modell paramétereinek beállítása "kézi iterációval" történt. A butanol, propanol és dekanol mért permittivitás értékei 200 MHz felett nagyon zajosak voltak.

A kapott eredmények alapján a tesztcellával és az alkalmazott modellel a 1-200 MHz tartományban lehetséges a gabona dielektromos állandójának mérése.

2.5 AZ ÚJ EGYESÍTETT GABONANEDVESSÉG-MÉRÉSI MÓDSZER

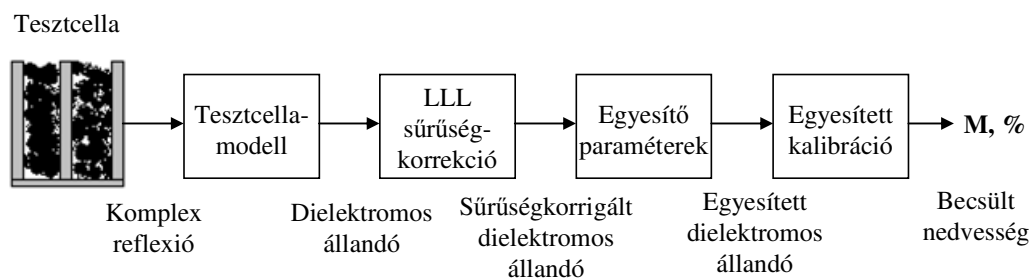
Az új nedvességmérési algoritmus fejlesztését a USDA-GIPSA-TSD végezte David B. Funk vezetésével. 1998, 1999, 2000, 2001 években aratott 4897 gabonaminta felhasználásával dolgozták ki az új VHF-UGMA módszert. A mérési összeállítás a 8. ábrán látható.



8. ábra: A tesztcella és a mérési összeállítás a USDA-GIPSA-nál

A tesztcella és a dielektromos modell ugyanaz, amelyet Lawrence és társai fejlesztettek USDA-ARS (Agricultural Research Center) keretében (Lawrence et al. 1999). A gabona betöltését szabványos tölcserrel végezték, amelyet a gabona térfogattömegének meghatározásához is használnak (Funk 2001). Lawrence-el ellentétben Funk célja nem a sűrűségfüggetlen kalibráció továbbfejlesztése volt, hanem a gabona dielektromos tulajdonságainak megismerése után a lehető legpontosabb és a gyakorlat számára leghasználhatóbb módszer kidolgozása.

A módszer több lépésből áll. A módszer egyik fontos újdonsága, hogy a nedvességmérési kalibráció nem közvetlenül a mért elektromos jel és a nedvesség, hanem a gabonahalmaz mért dielektromos állandója és a nedvesség között teremt kapcsolatot. A nedvesség meghatározásának folyamatát a 9. ábra mutatja. Az M2. mellékletben a módszer részletes folyamatábrája található.



9. ábra: A VHF-UGMA nedvesség-meghatározásának menete

A következőkben lépésről lépésre részletezem a módszer folyamatát.

2.5.1 Alkalmos frekvencia kiválasztása

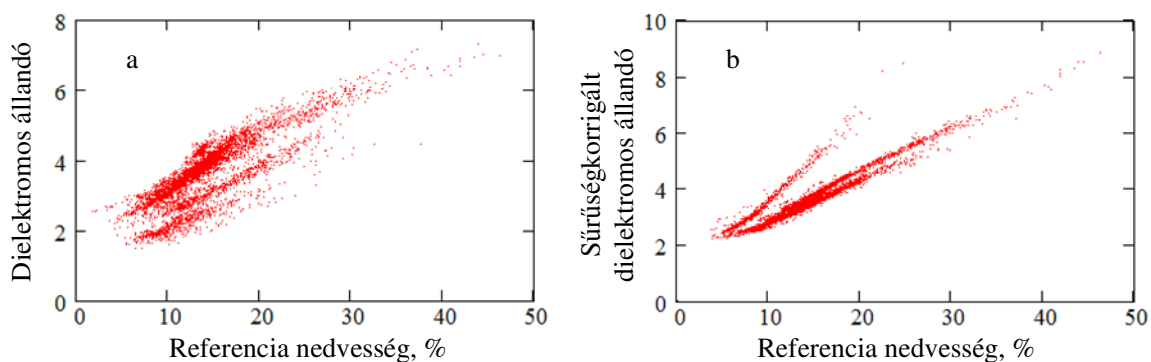
Funk (2001) kutatásai alapján azt tapasztalta, hogy a gyakorlatban használt 20 MHz körüli frekvenciánál magasabb frekvencián a vezetési hatás nem jelentkezik jelentősen, kisebb a variabilitás, és a kalibrációs összefüggés is közel lineáris. A legalkalmasabbnak a 150 MHz körüli mérőfrekvenciák adódtak. Annak figyelembevételével, hogy ne essen semmilyen távközlésileg tiltott tartományba, a 149 MHz-es frekvenciát választotta mérőfrekvenciának.

2.5.2 Sűrűségkorrekció

Funk a már korábbiakban ismertetett LLL sűrűségkorrekciót (12) alkalmazta. Mivel a tesztcella térfogata állandó, ezért a sűrűségek helyett a minta tömegét és céltömeget használt. A céltömegnek a minták átlagos tömegét (580 g-os értéket) választotta. Ez a minta dielektromos állandóját egy adott tömegű gabonahalmaz dielektromos állandójára normálja. Az alkalmazott képlet:

$$\varepsilon_d = \left(\left(\varepsilon^{1/3} - 1 \right) \cdot \frac{580}{W} + 1 \right)^{1/3} \quad (41)$$

ahol ε_d a sűrűségkorrigált dielektromos állandó, ε a mért dielektromos állandó, W a minta tömege, 580 a céltömeg grammban. A sűrűségkorrekció eredménye a 10. ábrán látható.



10. ábra Az LLL sűrűségkorrekció hatása gabonamintákra;

a: sűrűségkorrekció nélkül, b: sűrűségkorrekcióval

A 10. ábra alapján látható, hogy az LLL sűrűségkorrekció alkalmazásával az adatok kis szórású csoportokba rendeződnek. A csoportok formája és a rájuk illeszthető kalibrációs összefüggés alakja is nagyon hasonlóan adódott. Ez a felismerés ösztönözte az egyesített kalibráció megalkotását.

2.5.3 Egyesítő paraméterek

Az egyesítés menetét Funk és Mészáros dolgozta ki (Funk 2001, Mészáros 2007). Az egyesítő paraméterek arra szolgálnak, hogy a különböző gabonacsoportok mérési pontjait (10.b ábra) fedésbe hozzák, és így egyetlen kalibrációs összefüggés elegendő legyen az összes gabonára. Természetesen ettől a nedvesség meghatározása nem gabonafaj-független, mert a felhasználónak ugyanúgy választania kell gabonafajtát a mérés előtt. Az egyesítés nagy előnye a kalibráció fejlesztésénél jelentkezik. Ha a meglévő kalibrációba egy új gabonafajt kell bevenni, akkor könnyebb három, geometriai jelentéssel bíró paramétert meghatározni, mint egy teljes kalibrációt

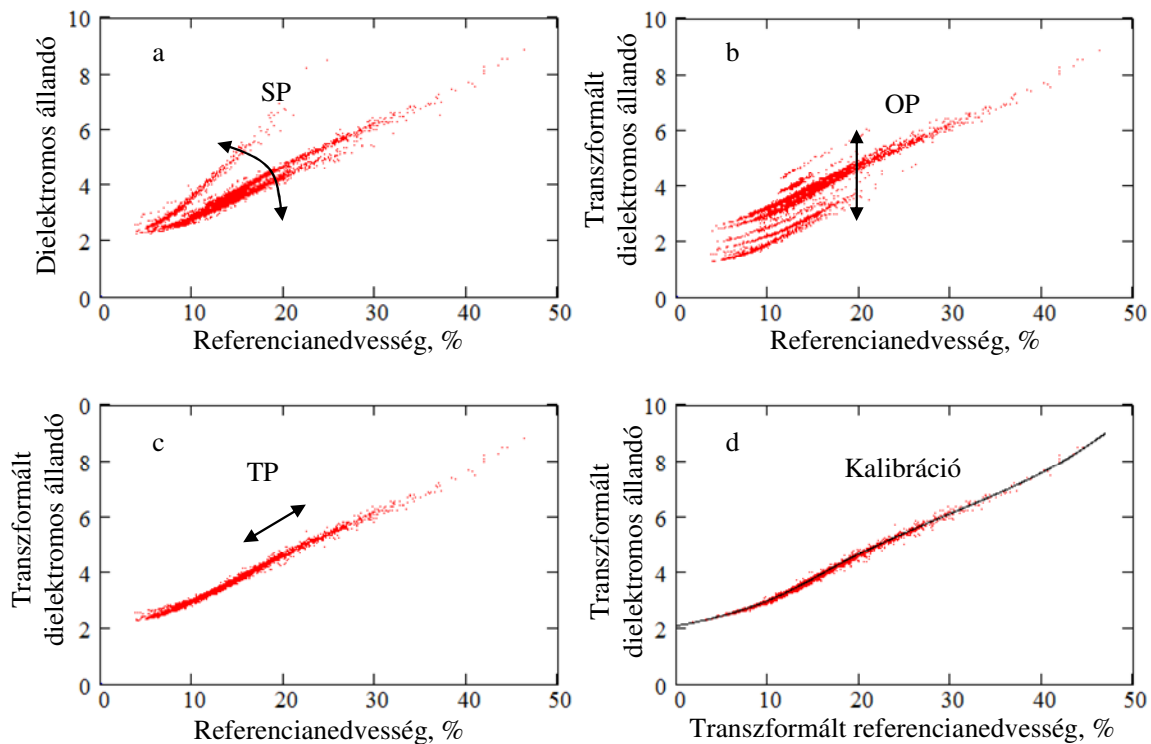
elkészíteni az új fajtához, ami egy 5-öd fokú polinom 6 paraméterrel, amelynek az extrapolációs hatékonysága is bizonytalan.

Az egyesítés lényege, hogy egyszerű lineáris transzformációkkal - szorzással, y-irányú eltolással és v(6;1) irányvektorú eltolással - a különböző csoportokat fedésbe hozza azért, hogy egyetlen kalibrációs összefüggés elegendő legyen minden gabonafajra és gabonafajtára. Az egyesítés három lépésben, három paraméter segítségével történik. Az egyesítés matematikai összefüggései:

$$\varepsilon_e = (\varepsilon_d - OP) \cdot SP + 2.5 + \frac{TP}{6} \quad (42)$$

$$M_{tp} = M + TP \quad (43)$$

ahol ε_e az egységesített, ε_d a sűrűségkorrigált dielektromos állandó, OP a y irányú eltolás paramétere, SP a meredekségi-paraméter, TP translációs-paraméter. A 11. ábra a paraméterek működését szemlélteti.



11. ábra: Az egyesítő paraméterek hatásának szemléltetése; a: a görbék meredeksége közti különbséget az SP paraméter; b: a görbék közti y-irányú eltolódását az OP paraméter; c: a (6;1) irányú "elcsúszását" a TP paraméter korrigálja; d: az egyesítés eredménye

A 11.a ábrán szembeötlő, hogy az egyes gabonacsoportoknak különböző a meredeksége. Ezért a meredekségi-paraméter (SP) mintegy forgatást végez, így a 11.b ábrán látható pontokat kapjuk. A meredekségi-paraméterek értékeit úgy határozták meg, hogy a 10 - 20 % nedvességtartalmú gabonákra illesztett egyenes meredeksége 1/6 legyen. A 11.b ábrán látható, hogy a gabonacsoportok között eltolódás van. Ezt az y irányú eltolás paramétere (OP) korrigálja, hogy a pontok fedésben legyenek. A harmadik paraméter (TP) is eltolást végez. A 11. c ábrán látható, hogy a pontok már fedésben vannak. Alaposabban tekintve az ábrát megfigyelhető, hogy az alacsony nedvességtartalmú tartományban a pontfelhők elválnak, annak ellenére, hogy a pontfelhők alakjai nagyon hasonlóak - ez a tény az ábrán nem látható. Azért, hogy az alacsony nedvességtartalmú tartományban is megfelelő legyen az egyezés, szükséges az utolsó lépés, melyben a "görbe mentén" (6;1) irányban történnek gabonacsoportonként a megfelelő nagyságú eltolások (TP). Az eltolás irányvektora (6;1), ez azt jelenti, hogy egy TP paraméter az adott gabonafaj dielektromos állandóját és a nedvességét 1:6 arányban eltolja. Az egyesítés eredménye a 11.d ábrán látható.

A 11.d ábrán a kalibrációs görbe is látható. Az összefüggés egy 5-öd fokú polinom, amely a TP paraméterrel transzformált referencia nedvesség és az egyesített dielektromos állandó között teremt kapcsolatot:

$$M_{tp} = \sum_{r=0}^5 (\epsilon_e)^r \cdot CC_r \quad (44)$$

ahol M_{tp} a becsült TP paraméterrel transzformált nedvesség, ϵ_e az egyesített dielektromos állandó, CC az 5-öd fokú polinom együtthatói. Ahhoz, hogy az igazi nedvességet kapjuk, még a transzformált nedvességből ki kell vonni a TP paramétert:

$$M = M_{tp} - TP \quad (45)$$

2.5.4 Hőmérsékletkorrekció

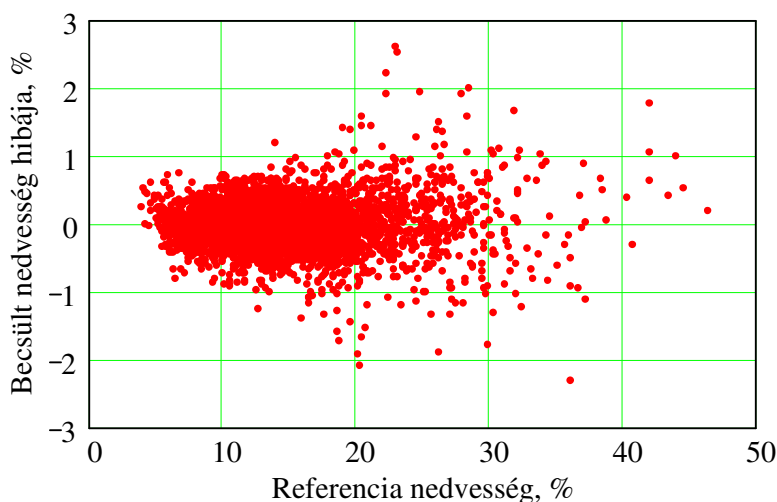
A hőmérséklet szignifikánsan befolyásolja a gabona dielektromos tulajdonságait, ezért a mért dielektromos állandóból számolt nedvességértéket korrigálni kell. Ismert, hogy a hőmérséklet korrekciós tényező nedvességtartalom függő, viszont a kutatás jelenlegi állásában ezek az összefüggések 149 MHz-es frekvencián nem ismertek. A (46) összefüggés az aktuális hőmérsékletkorrekciót mutatja, amely megfelelően működik szobahőmérséklet közeli hőmérsékleteken.

$$M_t = M - KTC \cdot (T - 25) \quad (46)$$

ahol M_t a hőmérsékletkorrigált becsült nedvesség, KTC a hőmérsékleti együttható gabonafajtánként, T a minta hőmérséklete Celsius fokban (Funk 2001, Funk et. al. 2005, Mészáros et al. 2005b). Pontosabb nedvességfüggő korrekció fejlesztése a 149 MHz-es mérésekhez a dolgozat írása közben még folyamatban van.

2.5.5 Az algoritmus pontossága

A nedvességmérés hibája az egyes gabonafajtákra jobbnak adódott, mint az USA-ban hivatalosan elfogadott dielektromos elven működő gabonanedvesség-mérő berendezéseké. A következő 12. ábra a nedvességmérési eredmények és a szárítószekrényes referencia módszerrel kapott nedvességértékek eltérését - a mérés hibáját - mutatja az 1998-2003 között mért gabonákra. Az összes gabonaminta nedvességmérési hibájának szórása 0,315 %.



12. ábra A VHF-UGMA nedvességmérési módszer hibája;
1998-2003 évjáratok, 6230 minta, 18 gabonafaj és 61 gabonafajta

2.5.6 Felmerült kutatási kérdések

A módszer közvetlen alkalmazásának az volt az akadálya, hogy a kutatáshoz használt tesztcella túl nagy volt ahhoz, hogy egy mai kor követelményeinek megfelelő nagyságú műszer készülhessen. Mindenképpen kisebb cella használata szükséges. Ezért a további kutatási irány, a kalibráció hatékonyságának megőrzésével a tesztcella lehetséges kicsinyítése lett. Ez azt jelenti, hogy megfelelő méretű cellát kell készíteni, és meg kell oldani, hogy az eredeti kalibráció alkalmazható legyen. Ezt az eljárást kalibrációátvitelnak nevezzük.

Gyakorlati szempontból a lehető legkisebb cella az optimális. Úgy tűnt, hogy a kicsinyítésnek csak az elektromágneses hullám terjedését befolyásoló tényezők és a gabona inhomogenitásából eredő hiba növekedése szab határt.

A kalibrációátvitel megoldásához szükséges volt, hogy megismerjem, mi okozhatja a permittivitás és nedvességmérési eredmények közötti különbséget, milyen követelmények vonatkoznak a nedvességmérési eredmények eltérésére, és mik az eddigi tapasztalatok a dielektromos elven működő nedvességmérők kalibrációátvitelével kapcsolatban. Végezetül, mivel olyan hálózatszámítási módszert alkalmaztam a tesztcellák modellezéséhez, amelyet eddig a nedvességmérésben nem alkalmaztak, ennek mélyebb megismerése is szükséges volt. Ezen témák összefoglalása az alábbiakban található.

2.6 MÉRŐMŰSZEREK PONTOSSÁGA ÉS EGYSÉGESÍTÉSE

Ebben a fejezetben - a kutatási feladataim megoldásához szükséges - a mérőműszerek pontosságával és egységességével kapcsolatos elméleti és gyakorlati háttérrel foglaltam össze.

A nedvességmérő műszerek pontossága nyilvánvaló követelmény, de az nem köztudott, hogy a kereskedelemben az különösen fontos, hogy a különböző műszerekkel mért eredmények egymással egyező eredményt szolgáltatassanak. Ez azért fontos, hogy semelyik kereskedelmi partnernek ne legyen a mérőműszerek eltéréseiből adódó anyagi hátránya. Azt az eljárást, amelynek során egy szabványosított sztenderdnek minősített mérőberendezéshez kalibrálnak egy másik mérőberendezést, a továbbiakban sztenderdizációnak nevezem.

2.6.1 Nedvességmérési eredmények eltérésének okai

A mérőműszerek nedvességmérési különbségeinek, varianciáinak okairól több szerző tesz említést, legteljesebben Hurburgh (1987) foglalja össze négy csoportba sorolva:

Minta hatása

- A minta tulajdonságai miatti nedvességmérési különbség a mérővel és a referencia módszerrel. Ez magában foglalja közösen minden nedvességmérőre a sűrűség, fajta, betakarítási sérülések, romlás, termőterület hatását.
- Betakarítás éve
- Földrajzi különbség

Berendezés hatása

- Modellek közti különbségek, amely a méréstechnikai különbség és a kalibráció különbségéből adódik össze.
- Egyedek közti különbség, nem tökéletes gyártás, javítás, amortizáció/degradáció
- Reprodukció, egy minta ismétlése

Referencia módszer

- Referencia módszer választása
- Laboratóriumok, azonos módszert használó különböző laboratóriumok
- Ugyanazon minta ismételt mérése

Mintavételezés

- Különböző mintavételezésből származó különbségek

Ezen lista és a korábban említett gabonatulajdonságok alapján a következőket vettük figyelembe: A sztenderdizáció során ugyanazt a mintát használjuk, ezért csak a halmazsűrűség, hőmérséklet és a nedvesség változása okozhat különbséget; a berendezések hatásánál a kalibráció ugyanaz, de a cellák méretben és mérési módban is különbözők lehetnek, továbbá fontos a mérőműszer pontossága és zaja; a referencia módszerre és a mintavételezésre vonatkozó pont nem vonatkozik a sztenderdizációra.

2.6.2 Szervezetek és szabályok

Megközelítően 12.000 gabona kereskedés van csak az USA-ban, akiknek legalább egy államilag ellenőrzött nedvességmérő berendezésük van. Mivel a nedvességtartalom egy fontos faktor az árképzésben, ezért sok régiós, nemzeti és nemzetközi szervezet felelős, hogy a tisztességes kereskedelmet biztosítsa (Funk 1997).

A nemzetközi szabályokat az International Organization of Legal Metrology (OIML) biztosítja, a szabályok gyűjteménye az International Recommendation (International Organization of Legal Metrology 1984). Az USA-ban a National Conference on Weights and Measures (NCWM) együttműködve a USDA-GIPSA-val létrehozta a National Type Evaluation Programot (NTEP), amely általános érvényű előírásokat tartalmaz a hivatalosan elfogadott nedvességmérőkre. A nemzetközi és az amerikai előírások nagyon hasonló eljárásokat és toleranciákat határoznak meg.

Az amerikai szabályozás alapja, hogy a USDA-GIPSA tulajdonában lévő, hivatalosan elfogadott nedvességmérő modell (Dickey-john GAC2100) két példányát minden évben tesztelik és módosítják a kalibrációt az amerikai szárítószekrényes referenciamódszer alapján, így tartják fenn a kereskedelmileg elfogadható kalibrációt a legfontosabb gabonafajtákra. Ez a Calibration and Evaluation Maintenance Program.

A követelmény, hogy egy 11-12,5 % nedvességtartalmú búzaminta esetén az azonos típusú referencia műszerek (Dickey-john GAC2100) közti azonos mintán 6 ismételt mérés átlagos eltérésének kisebbnek kell lennie mint 0,05 %. A forgalomban lévő hivatalosan elismert műszereknek (Dickey-john GAC2100) pedig 0,15 %-nál kell kisebbnek lennie az átlagos eltérésnek a referencia műszer által megadott értéktől (NIST 1996).

2.6.3 Eddigi törekvések és eredmények

A Funk (1990) és Hurburgh (1981) szerint a nemzetközi egységesítéshez az egyik legegyszerűbb és legfontosabb feladat a referencia módszerek egységesítése, mivel a referencia módszerek jól dokumentáltak, szisztematikusan eltérő eredményt adnak. A másik fontos szükséglet az alapvető technikák fejlesztése.

A nedvességmérők egységesítésének (továbbiakban: sztenderdizáció) vizsgálatára vonatkozó munkát az angol nyelvű irodalomban nem találtunk. Funk (1999) szerint sokan próbálkoztak kalibrációátvitellel, de az általános eredmény nagyon lehangoló volt, hacsak nem a két műszer jóformán elektromosan és mechanikusan azonos volt. Az általános vélemény, hogy a frekvencia, a tesztcella geometria, az áramkör és a másodlagos korrekciók szinte biztos, hogy elfogadhatatlan nedvességmérési különbséget okoznak.

A mi esetünkben azért volt esély, hogy lehetséges a kalibrációátvitel, mert a VHF-UGMA nedvességmérési algoritmusban a sűrűségkorrigált dielektromos állandó mérőműszertől független fizikai paraméter.

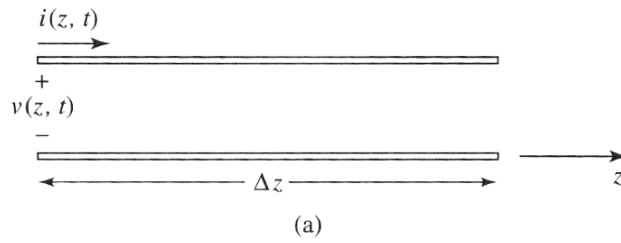
2.7 OSZTOTT PARAMÉTERŰ HÁLÓZATSZÁMÍTÁS ELMÉLETE

Ebben a fejezetben - a kutatási feladataim megoldásához szükséges - hálózatszámítási módszerek elméleti háttérét foglalom össze. Ezekkel sikerült a gabonanedvesség méréséhez eddig nem alkalmazott modellt megalkotni.

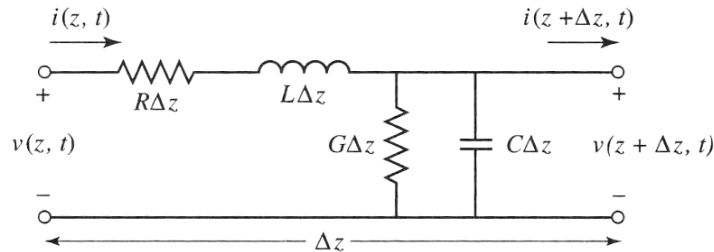
2.7.1 Tápvonal

A tápvonal elmélete a koncentrált paraméterű áramköri és az elektromágneses hullámok terjedésének elmélete között helyezkedik el, és különösen fontos a mikrohullámú hálózatok számolásához. A lényeges különbség az áramköri és az osztott paraméterű tápvonal elmélete között az elektromágneses hullám hullámhossza. Az áramköröknél a fizikai méretek sokkal kisebbek, mint az elektromágneses hullámhossz, míg a tápvonalaknál a hullámhossz azonos nagyságrendbe esik az áramkör hosszával, de nem kisebb. Így a tápvonal egy elosztott paraméterű hálózat, ahol az áramerősség és a feszültség nagysága kvázi-stacionárius a vonal mentén.

A vonalnak van saját induktivitása, ellenállása, sőt kapacitása és sőt vezetőképessége a dielektromos veszteség miatt a vezetők közti anyagban. A hálózat számításához be kell vezetni vonalmenti mennyiségeket, amelyek megadják az egységnyi hosszra vonatkozó ellenállást (R), induktivitást (L), vezetőképességet (G) és kapacitást (C). Egy elemi hosszra a tápvonalat a 13. ábra mutatja.



13. ábra Elosztott paraméterű hálózat elvi vázlata (Pozar 1998)



A Kirchhoff törvényeket szinuszos hullámokra felírva a 13. ábrán látható elemi szakaszra ($\Delta z \rightarrow 0$) a következő időfüggetlen differenciálegyenleteket kapjuk:

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j \cdot \omega L) \cdot I(z) \quad (47)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j \cdot \omega C) \cdot V(z) \quad (48)$$

ahol R, L, G, C a vonalmenti ellenállás, induktivitás, vezetőképesség, és kapacitás. A (47) és (48) egyenletekből kifejezhető a feszültség és az áramerősség szeparált hullámegyenlete:

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} - \gamma^2 \cdot V(z) = 0 \quad (49)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} - \gamma^2 \cdot I(z) = 0 \quad (50)$$

ahol γ a terjedési együttható, és

$$\gamma = \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C)} \quad (51)$$

Az (49) és (50) hullámegyenleteknek (49) és (50) egyenletek a megoldásai. Ezek a haladó és visszavert hullámok összegei, mind a feszültségre mind az áramerősségre:

$$V(z) = V_0^+ \cdot e^{-\gamma z} + V_0^- \cdot e^{\gamma z} \quad (52)$$

$$I(z) = I_0^+ \cdot e^{-\gamma z} + I_0^- \cdot e^{\gamma z} \quad (53)$$

Az Ohm törvény alapján kapjuk az ún. hullámimpedanciát, amely fontos szerepet játszik a tápvonalak jellemzésében:

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = \frac{-V_0^-}{I_0^-} \quad (54)$$

A hullámimpedancia a vonalmenti paraméterekkel is kifejezhető:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j \cdot \omega \cdot L}{G + j \cdot \omega \cdot C}} \quad (55)$$

Ahhoz, hogy a hullámimpedanciát meg tudjuk határozni, szükséges a vonalmenti paraméterek meghatározása. Ezek a paraméterek végtelen felületre vett és vonalmenti integrálokkal számolhatók:

$$L = \frac{\mu}{|I_0|^2} \int_S \bar{H} \cdot \bar{H}^* ds \quad (56)$$

$$R = \frac{R_s}{|I_0|^2} \int_{C1+C2} \bar{H} \cdot \bar{H}^* ds \quad (57)$$

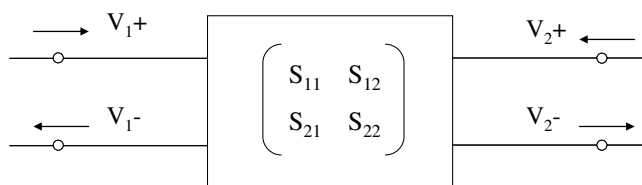
$$C = \frac{\epsilon}{|V_0|^2} \int_S \bar{E} \cdot \bar{E}^* ds \quad (58)$$

$$G = \frac{\omega \epsilon''}{|V_0|^2} \int_S \bar{E} \cdot \bar{E}^* ds \quad (59)$$

ahol H a mágneses térerősség, E elektromos térerősség.

2.7.2 Hálózatok jellemzése szórési paraméterekkel

A gyakorlati mikrohullámú mérésekben a haladó hullámok nagyságát és fázisát mérik. A szórési mátrix megadja az összefüggések komplett leírását egy hálózatnak minden be és kimenetére, amint a 14. ábra mutatja:



14. ábra A szórási paraméterek kétkapus áramkörben

A szórási mátrix az alábbi módon teremt kapcsolatot a bemenő és kimenő hullámok között:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (60)$$

ahol S_{ij} a szórási paraméterek, V_i a komplex amplitúdók, "+" a bemenő, "-" a kimenő hullámokat jelölik.

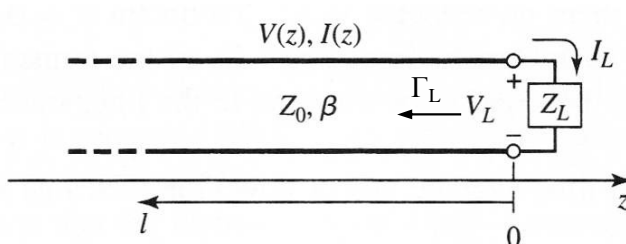
A szórási paraméterek jelentését a (61) összefüggés adja meg:

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+} \quad V_i^+ = 0 \quad i \neq j \text{ esetben} \quad (61)$$

Egy szórási paraméter a kimenő és bemenő hullám feszültségének hányadosa, miközben a többi kapun nincs bemenő hullám. Ez azt jelenti: $S_{11} = V_1^- / V_1^+$, miközben, V_2^+ nulla - ami nem más, mint az áramkör reflexiós tényezője az 1-es kapunál, míg a 2-es kimenet illetetven lezárt. S_{22} ugyanez csak a másik bemeneten. S_{12} az 1-es kaputól a 2-es felé a transzmissziós tényező, S_{21} pedig a transzmissziós tényező a másik irányból.

2.7.3 Lezárás

Ha egy hullámvezetőt lezárunk, akkor a lezárásról az elektromágneses hullám visszaverődik. A 15. ábra egy hullámvezető lezárását szemlélteti.



15. ábra Tápvonal lezárás Z_L impedanciával

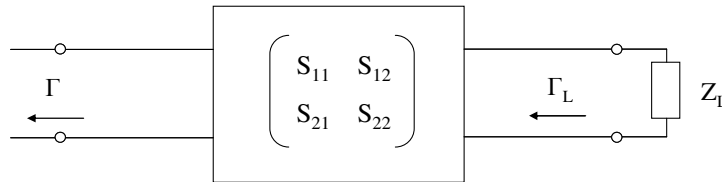
Ebben az esetben a reflexiós tényező (Γ_L) a következő képlettel számolható:

$$\Gamma_L = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (62)$$

ahol Z_L a záróimpedancia, Z_0 a tápvonal hullámimpedanciája.

Három szélsőséges eset van. Ha a záróimpedancia értéke $Z_L=0$, akkor a reflexiós tényező értéke -1 lesz, azaz a hullám teljes mértékben visszaverődik és egy 180° -os fázisugrást szenved. Ha $Z_L=\infty$, ezt nyitott lezárásnak nevezik, ekkor a reflexiós tényező értéke $+1$, ekkor is teljes a visszaverődés fázisugrás nélkül. Ha a $Z_L=Z_0$, akkor nem verődik vissza semmi, ezt nevezik illesztett lezárásnak.

Egy ismert szórási paraméterű kétkapus hálózat Z_L záróimpedanciával történő lezárását a 16. ábra mutatja:



16. ábra Egy S szórási mátrixszal leírható hálózat lezárása egy Z_L impedanciával

Ebben az esetben a hálózat elején mért reflexiós tényezőt a következő képlet adja meg:

$$\Gamma = S_{11} + \frac{\Gamma_L \cdot S_{12} \cdot S_{21}}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_L} \quad (63)$$

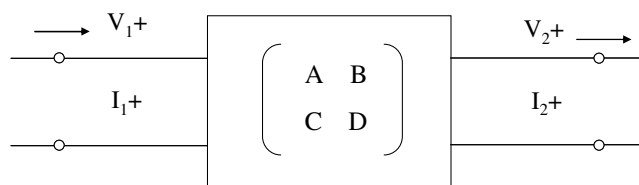
2.7.4 Átmeneti szakasz elmélete

Ha egy hullámvezető egy pontján a hullámvezető mérete megváltozik, még ha a hullám ellenállása nem is, akkor is reflexió jön létre ezen a helyen. Ezeket a helyeket diszkontinuitásoknak nevezik (Pojar 1998). Ezeknek a helyeknek a jellemzésére általában Y kapcsolásban kapcsolt impedanciákat használnak (Kraus 1960). Bizonyos gyakran használt geometriákra vannak programok, amelyek ezek értékeit számolják.

2.7.5 ABCD mátrix reprezentáció

Az S reprezentáció használható tetszőleges számú ki- és bemenetű hálózat jellemzésére, de a gyakorlatban sok esetben a hálózat több kétkapú kaszkádkapcsolásaként jön létre. Ezekben az esetekben kényelmesebb az ABCD reprezentáció használata, mert a teljes rendszer ABCD mátrixa az egyes elemek ABCD mátrixainak a szorzataként kapható meg.

Az ABCD mátrix kapcsolatot teremt a bemenő feszültség és áram, és a kimenő feszültség és áram között a (64) és (65) egyenletek szerint.



17. ábra ABCD mátrix kétkapus áramkörben

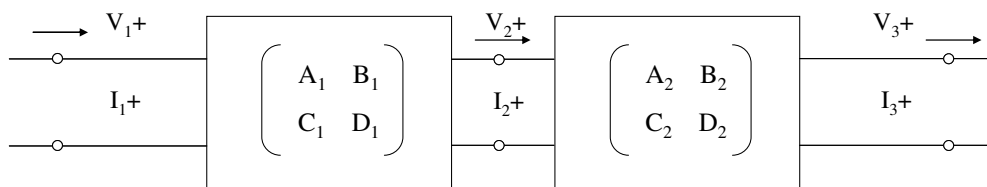
$$V_1 = A \cdot V_2 + B \cdot I_2 \quad (64)$$

$$I_1 = C \cdot V_2 + D \cdot I_2 \quad (65)$$

Ez írható mátrixos formában:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (66)$$

Amennyiben a 18. ábra szerint két hálózatot egymás után kapcsolunk, akkor az eredő hálózat ABCD mátrixa a (67) képlet alapján számolható.



18. ábra Kétkapus áramkörök kaszkád kapcsolása

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (67)$$

Természetesen a két ABCD mátrix (67) a mátrixszorzás szabályainak megfelelően összeszorozható, ami megadja az eredő hálózat ABCD mátrixát.

Az ABCD mátrix reprezentáció és a szórási paraméterek között a M3. mellékletben megadott összefüggések teremtenek kapcsolatot.

2.7.6 Kvázi-TEM módus

A legalacsonyabb határfrekvenciájú hullámforma, amely a hosszú hullámhosszknál vagy akár egyenáramoknál is van az ún. TEM hullámforma. Mind a villamos, mind a mágneses térerősségnek csak transzverzális, a hullám haladási irányára merőleges összetevője van.

Az inhomogén dielektromos kitöltésű tápvonalakban a térerőség egy része a dielektrikumban, a másik része a levegőben halad. Ha a frekvencia alacsony és a tápvonal

elektródái közti távolság kisebb, mint a hullámhossz huszad része ($d < \lambda/20$), akkor kvázi-TEM módusú terjedés alakul ki. Ebben az esetben a terjedési sebességgel (v_p) és a fény sebességével (c) kifejezhető dielektromos állandó:

$$\epsilon_{ef} = \frac{c^2}{v_p^2} \quad (68)$$

nem a tápvonal dielektromos állandóját adja, hanem az effektív dielektromos állandót. Az effektív dielektromos állandó értéke szemléletesen annak a dielektrikumnak a dielektromos állandója, amely az egész tápvonal körüli teret kitölti és a hullám terjedési sebessége megegyezik az inhomogén esetével.

A terjedési sebesség elvileg a Maxwell egyenletekből számolható, aminek segítségével az effektív dielektromos állandó számolható, de kvázi statikus esetben:

$$\epsilon_{ef} = \frac{C}{C_0} \quad (69)$$

ahol C a tápvonal vonalmenti kapacitása az inhomogén közeggel, és C_0 az üres cella vonalmenti kapacitása.

Bevezethető a látszólagos és a tényleges dielektromos állandó közötti kitöltés összefüggése a kvázi-TEM módusú tápvonalakra:

$$\epsilon_m = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon_{ef} - 1} \quad (70)$$

ahol ϵ_m a kitöltési tényező reciproka.

2.7.7 Szkinhatás

Nagy frekvencián az áram a vezető felületén folyik, ez a jelenség szkinhatás néven ismert. A szkinmélység az a méret, ahol az áramerősség $1/e$ -ed részére csökken. A szkinmélység:

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (71)$$

ahol ω a hullám körfrekvenciája, μ a mágneses permeabilitás és σ az anyag fajlagos vezetőképessége. A felületi ellenállás a következő képlettel számolható:

$$R_s = \frac{1}{\sigma \cdot \delta_s} \quad (72)$$

2.8 AZ IRODALOM ÖSSZEFOGLALÁSA ÉS HIPOTÉZISEK

Az irodalom áttekintése után megállapítható volt, hogy a VHF-UGMA a legígéretesebb nedvességmérő módszer, amely a gyakorlati nedvességmérésben áttörést jelenthet. A gyakorlatban való alkalmazáshoz szükséges a tesztcella méretének csökkentése és a kifejlesztett kalibráció átvitele. Amennyiben a dolgozatban bemutatott nedvességmérő család lesz az USA-ban a hivatalosan elfogadott műszer ill. módszer, abban az esetben szigorú szabályok fognak vonatkozni arra, hogy milyen pontossággal kell a referencia tesztcellával egyező értéket adniuk.

A feladat megoldásához a betöltésekkel kapcsolatban azt a következtetést vontuk, le hogy csak a halmazsűrűség különbsége okozhat eltérést. A mérések során a fő hibaforrások a minta hőmérsékletének és a nedvességtartalmának változása, és a műszer pontossága lehet. Ezen a cellán kívül nyitott tápvonal típusú tesztcellákkal, dielektromos elven működő gabonanedvesség-mérő kalibrációátvitellel kapcsolatban nem találtam eredményeket. Viszont a cellák modellezéséhez nagyon ígéretes módszernek mutatkozik az ABCD mátrixos hálózatszámítási módszer.

2.8.1 Hipotézisek

1. A dielektromos nedvességmérés kalibrációja - egy meghatározandó nagyságú frekvencia tartományon belül - pontos tesztcellamoddellel átvihető bármilyen tesztcellára.
2. Az LLL sűrűségkorrekció alkalmas a halmazsűrűség változékonyságából eredő hibák kiküszöbölésére.

3 CÉLKITŰZÉS

A cél az eredeti tesztcellán fejlesztett VHF-UGMA nedvességmérési kalibráció átvitele volt a gyakorlati szempontból előnyösebb nedvességmérő cellákra.

Tudományos cél volt, hogy megállapítsam, lehetséges-e a dielektromos elven működő, de jelentős különbséggel rendelkező tesztcellák sztenderdizációja; továbbá az LLL sűrűségkorrekció hatékonyságának bizonyítása.

A célok eléréséhez szükséges feladatok

1. Meghatározni a lehetséges tesztcella-konstrukciókat és mérési módokat, amelyeken a VHF-UGMA módszer alkalmazható. Meghatározni ezek előnyeit és hátrányait. Ezen belül kiemelten fontos megállapítani annak a lehetőségét, hogy a nedvesség meghatározásához elegendő-e csak a reflexiós tényező nagyságának mérése.
2. A tesztcella modellezés továbbfejlesztése, hogy a modell kis változtatásokkal alkalmas legyen:
 - 2.1 változatos felépítésű tesztcellák matematikai leírására
 - 2.2 a geometriai és az elektromos paraméterek hatásának kutatására és optimalizálására.
3. Megfelelő kalibrációs és sztenderdizációs anyagok alkalmazása, és sztenderdizációs módszerek kidolgozása. Ezen belül kiemelten fontos megállapítani, hogy a kis veszteségi tényezőjű anyagok alkalmasak-e a sztenderdizációhoz.
4. Feltárni a különböző - gyakorlati szempontból fontos - betöltési módszerek hatását.
 - 4.1 Meghatározni, hogy melyik betöltés a legalkalmasabb a variabilitás szempontjából.
 - 4.2 Meghatározni, hogy van-e eltérés a mért nedvességekben különböző betöltésekkel.
 - 4.3 Ha van eltérés, akkor megállapítani, hogy mi okozza, és milyen sűrűségkorrekcióval lehet megszüntetni az eltéréseket.
5. Meghatározni a betöltési módok és a tesztcella méretének hatását a kalibráció átvihetőségére, és ha arra szükség van, akkor megoldani a kalibráció átvitelét.

4 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

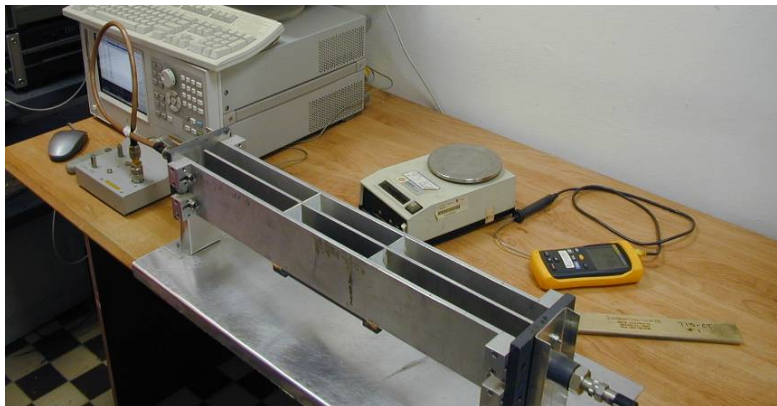
A kutatás középpontjában egy már kidolgozott nedvességmérési módszer, a VHF-UGMA módszer állt. Mivel a legtöbb mérés ennek a módszernek megfelelően történt, ezért először az alap mérési összeállítások és a nedvességmérés menete kerül bemutatásra. Ezt követi a mérésekhez használt anyagok ismertetése, majd a módszerek az egyes kutatási kérdések szerint csoportosítva.

4.1 MÉRÉSI ÖSSZEÁLLÍTÁSOK ÉS ESZKÖZÖK

4.1.1 Cellák

4.1.1.1 Mester tesztcella

A USDA-GIPSA-TSD (továbbiakban GIIPSA) az eredeti tesztcellából (továbbiakban mester tesztcella) kettőt készített, az egyik náluk, a másik nálunk a Budapesti Corvinus Egyetem Fizika-Automatika Tanszékén található. A pontos leírás a 2.5 fejezetben, a tesztcella főbb méretei pedig az 1. táblázatban találhatóak. A két cella paraméterei azonosak. A tanszékünkön lévő cellát és a mérési összeállítást a 19. ábra mutatja.



19. ábra A tanszékünkön lévő mester tesztcella és a mérési összeállítás

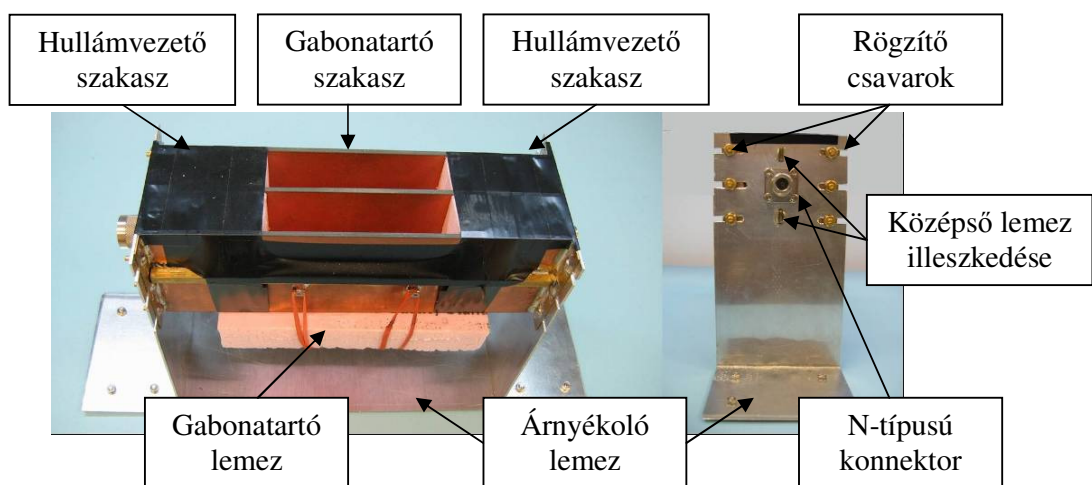
A mester tesztcellák adottak voltak, ezek megváltoztatása nem volt cél, mivel ezen fejlesztették a nedvességmérési kalibrációt, ez az alapja a kalibráció átvitelének. Egy módosításra viszont szükség volt. Méréseink során bizonyossá vált, hogy a mérést valamelyest befolyásolja az asztal anyaga. Ez azért jelentett problémát, mert a USDA-GIPSA-nál levő tesztcellát - egyéb okokból - át kellett helyezni egy másik helyiségbe egy másik asztalra, másrészt a tanszékünkön lévő cella sem lehet ugyanolyan asztalon, mint az eredeti. A problémát megoldotta a cella alá 10 cm távolságra szerelt alumínium lemez. A lemez elektromos kontaktusban van a cellával. Ezzel a változtatással kis mértékben megváltozott a cellák viselkedése, amely a tesztcellamodell változtatását igényelte.

1. táblázat A mester tesztcella és a prototípus tesztcella geometriai adatai

	Lapmagasság (mm)	Hullámvezető hossza (mm)	Gabonatrtó hossza (mm)	Lemeztávolság (mm)	Lemezvastagság (mm)	Térfogat (ml)
Mester	90	223.8	152.4	31.4	4,8 és 6,8	861
Prototípus	76.2	63.5	101.5	26.8	3.2	415

4.1.1.2 Prototípus tesztcella

A kalibrációátvitel vizsgálatához több prototípus tesztcellát készítettünk. Ezeken teszteltük a méretváltoztatásokkal kapcsolatos feltételezéseinket. Dolgozatomban csak a 20. ábrán látható, prototípus VI-nak nevezett tesztcellán (továbbiakban: prototípus tesztcella) történt méréseket tartalmazza.



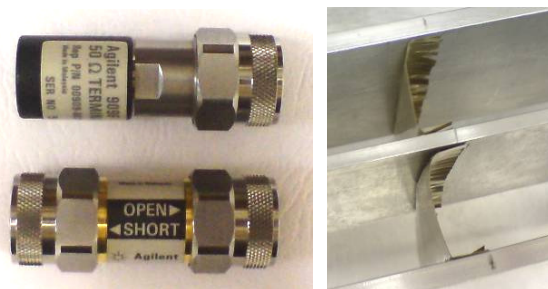
20. ábra A kalibrációátvitel vizsgálatához használt prototípus tesztcella

A prototípus tesztcella a mester tesztcellához hasonlóan három párhuzamos lemezből áll. Ezekhez nyomtatott áramkört lemezeket használtunk, mert könnyen beszerezhetők és forraszthatók. A cella két véglemeze alumínium, ezeken található az N-típusú csatlakozók és a párhuzamos lemezek rögzítése. A két külső lemez helye csavarok segítségével állítható. A középső lemeztől a végeinél eltávolítottuk a réz burkolatot, és a nyáklemez üvegszálás belső része, mint szigetelő anyag a véglemezek réseibe illeszkedik. A középső lemez közepén a konnektor középső elektródájához van forrasztva. A cella alatt elhelyezkedő árnyékoló lemez 10 cm-re van a cella aljától. A hullámvezető szakaszban polisztirol anyag található, amely elsősorban a gabonát határolja, másrészt a cella mechanikai stabilitását növeli. A cella alján ugyancsak polisztirol lemez tartja a gabonát a gabonatartó szakaszban.

4.1.2 Mérőműszerek és mérési összeállítások

Az elektromos mérésekhez a USDA-GIPSA laboratóriumában a HP-4291A (8. ábra), tanszékünkön az E4991A (19. ábra) RF impedanciamérőt használtuk. A HP-4291A mérési

tartománya 1-1800 Mz, a E4991A 1-3000 MHz frekvenciatartományban mér. A tesztcellákat 50 Ω -os precíziós koaxiális kábel köti össze a mérőműszerekkel. A cella végére helyezhető a záróimpedancia, ami alap esetben ún. illesztett precíziós 50+0j Ω . Ez az eset volt a kalibráció fejlesztésekor. Ezen kívül lehetséges az úgy nevezett rövidzár vagy nyitott lezárás is, amiket a 21. ábra bal panelén látható impedanciákkal lehet megvalósítani.



21. ábra Lehetséges záróimpedanciák és a rövidzár lemezek

A tesztcellát rövidzár üzemmódban úgy is lehet használni, hogy a cella lemezeit valamilyen módon elektromosan összekötjük. Erre rézlemez használtunk, amely be volt vágdosva és U alakban meghajlítva (21. ábra jobb oldali kép), hogy a cellalemezek közé befeszüljön, és könnyen lehessen mozgatni. Ezen a módon vizsgáltuk a rövidzár üzemmód tulajdonságait.

4.1.3 Az alkalmazott betöltések

Eredetileg a kalibrációt tölcséres betöltéssel készítették. A szándék az volt, hogy a betöltés operátortól független legyen. A tölcsér, amit használtak az a USDA szabványos tölcsére, amit a gabona-halmazsűrűség méréséhez is használnak (22. ábra). A betöltések vizsgálata során a tölcséres betöltés mellett kézi betöltést és egy saját készítésű ejtő mechanizmust (továbbiakban automatikus betöltés) alkalmaztunk.



22. ábra: Tölcséres, kézi és automatikus betöltési mód

A tölcsér lyukátmérője 5 cm és nyílása a tesztcella felett 5 cm magasságban volt, és a minta kb. 3 másodperc alatt ürült ki a tölcsérből

A kézi betöltést úgy végeztük, hogy a gabonartartó edényből közvetlenül öntöttük a gabonát a tesztcellába a 22. ábrán látható módon, ügyelve arra, hogy egyenletesen, a cella hosszanti

irányában ide-oda mozgatva, körülbelül 10 másodperc alatt töltjük meg a cellát. Ezzel szándékosan kiküszöböltük a különböző felhasználók betöltési módjának különbségéből adódó eltérést.

A harmadik betöltési módszer az automatikus betöltés. Az automatikus betöltés igen elterjedt a gyakorlatban használt gabonanedvesség-mérő műszerekben. Mi a cellára pontosan illeszkedő fémdobozt készítettünk és használtunk (22. ábra), amelynek kihúzható fémlapja 5 cm magasságban helyezkedett el a cella fölött. Egy fémlap hirtelen kirántásával a gabona pillanatszerűen zúdult a tesztcellába.

4.2 A MÉRÉS ÁLTALÁNOS MENETE

A mérés megkezdése előtt kalibrálni kell a RF impedancia mérőket az ún. vonatkoztatási síkban, ez a mi esetünkben a koaxiális kábel vége, ahol a tesztcella csatlakozik. A tesztcella csatlakoztatása előtt a 21. ábrán látható záróimpedanciákat kell egymás után csatlakoztatni nyitott, zárt és 50Ω sorrendben. Az impedanciamérő műszer ezek alapján bekalibrálja önmagát.

A gabonamérések előtt elegendő időt hagyunk, hogy a minta elérje a szobahőmérsékletet. Ezalatt a minta légmentesen zárva volt, hogy a nedvessége ne változzon. A mérés előtt mértük a minta hőmérsékletét, ehhez $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ pontosságú digitális hőmérőt használtunk. A gabonát a cellába mindig úgy töltöttük, hogy az túltelítődjön, majd egy irányban 2-szer ide-oda húzogatva a lehúzó rúddal lesimítottuk a mintát. Ezt az eljárást és eszközt használják a USDA-GIPSA szabványos halmazsűrűség méréshez is.



23. ábra A betöltés és lehúzás folyamata

A cella alatt lévő tálcát eltávolítottuk, és az impedancia mérővel megmértük a komplex reflexiók tényezőjét $1\text{-}501 \text{ MHz}$ frekvenciatartományban 2 MHz lépésközzel. A gabona a tesztcella középső részén levő elhúzható lemez kihúzásával ürült ki. A mérés után a cellában lévő gabona tömegét lemértük, ehhez $0,1 \text{ g}$ pontosságú hitelesített labormérleget használtunk.

4.3 ANYAGOK

4.3.1 Kalibrációs anyagok

A kalibrációs anyag esetében követelmény volt, hogy pontosan ismerjük a permittivitást az adott frekvenciatartományban. Kívánatos, hogy ne legyen mérgező, higroszkópos, viszkózus és drága. A folyadékok előnye, hogy nem kell sűrűségkorrekció, viszont szigetelni kell a cellát, hogy ne folyjon ki. A granuláris anyagok egyszerűbben használhatók, de a sűrűség változatossága betöltésről betöltésre még sűrűségkorrekcióval is többlet bizonytalanságot vihet a módszerbe. Másrészt általában ismert a granuláris anyag tömbi dielektromos állandója, de mint granulátum a dielektromos állandót csak származtatni lehetne, aminek pontossága nem feltétlen elégséges. Ezek miatt a tesztcella kalibrációjához folyadékokat kerestünk.

Ismereteink alapján a legalkalmasabb folyadékok a már az irodalomban is említett alkoholok. A permittivitásuk a gabonák permittivitás tartományába esik, nem különösen mérgezők, és egy használat során feltehetőleg nem vesznek fel számottevő mennyiségű vizet. Ezért a tesztcellák dielektromos kalibrációjához, a modellparaméterek meghatározásához alkoholokat használtunk. Az alkoholok permittivitását a Debye modellből határoztuk meg a következő képlettel (Debye 1929):

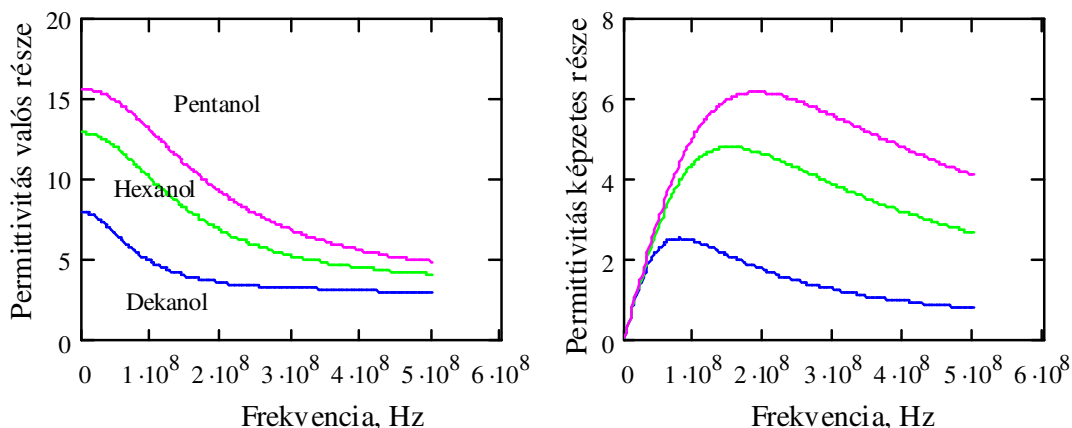
$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j \cdot \frac{f}{f_r}} \quad (73)$$

ahol ε_s a statikus dielektromos állandó, ε_{∞} a végtelenben vett permittivitás (optikai érték) és f_r a relaxációs frekvencia. Az általunk használt alkoholokra vonatkozó paramétereket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat A Debye modellben alkalmazott paraméterek a kalibrációhoz használt alkoholokhoz (Lawrence et al. 1998b)

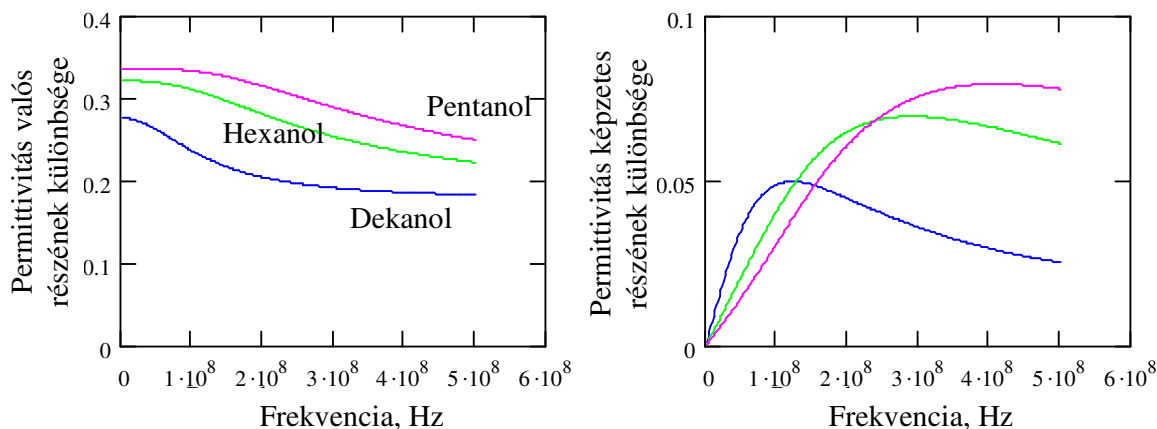
	ε	ε_{∞}	f_r , MHz	Tisztaság
1-Dekanol	7,98	2,9	80	99%
1-Hexanol	12,9	3,3	152	99%
1-Pentanol	15,66	3,33	190	99%

A 24. ábra az alkoholok elméleti permittivitását mutatja az általunk mért frekvenciatartományban.



24. ábra Az általunk használt alkoholok elméleti permittivitása, 100%-os tisztaság esetén

Az alkalmazott alkohol tisztasága a gyártó adatai alapján 99%-os, ami azt jelenti, hogy akár 1%-ban feltehetőleg vizet tartalmaz. Arról nincs tudomásunk, hogy milyen mértékben befolyásolja a víz az alkohol dielektromos állandóját, ezért az LLL keverékformulával 1% víz és 99% alkohol keverékét számoltuk frekvenciánként. Ez egy igen leegyszerűsített megközelítés, de feltehetőleg, mint egy felső korlát becsüli a lehetséges hibát. Az így kapott keverék 100%-os alkoholhoz viszonyított permittivitásának eltérését a 25. ábra mutatja.



25. ábra A 99 % alkohol és 1 % víz keverékének (LLL-keverékformulát alkalmazva) és a 100 % alkohol permittivitásának különbségei

Ez a megközelítés csak abban az esetben adna helyes értéket, ha víz és alkohol molekulárisan nem hatna egymásra, de mivel a molekulák egymásra hatva csökkentik a relaxációs frekvenciát, ezért a hatás valószínűleg kisebb. Másrészt, ha az 1%-os rész nem víz, a hatás akkor is kisebb.

Az alkoholok hőmérsékletfüggése és pontos viselkedése sem ismert pontosan ebben a 100-200 MHz körüli frekvencia tartományban, ezért a kalibráció pontosságának meghatározása további vizsgálatot igényel.

4.3.2 Sztenderdizációs anyagok

A sztenderdizáció célja, hogy egy mérőberendezést úgy "kalibráljunk", hogy egy szabványosított, sztenderdizált mérőműszerrel megadott hibahatáron belüli egyezést szolgáltatasson. Mivel a sztenderdizációs anyagok esetében nem kritérium, hogy az anyag permittivitása ismert legyen, a cella szigetelését elkerülendő granuláris anyagokat választottunk és használtunk.

4.3.2.1 Gabonák

A gabona, mint sztenderdizációs anyag kézenfekvő volt. Előnye, hogy könnyen rendelkezésre áll, visszanedvesítéssel lehet változtatni a nedvességtartalmát. Hátránya, hogy a nedvessége változhat és hajlamos a romlásra.

A sztenderdizációhoz 8 fajtól összesen 328 gabonaminta mérési eredménye állt rendelkezésre. Ezeket a USDA-GIPSA-nál mérték kérésünkre 2006-ban. Minden mintát egyszer mérték a mester és a prototípus tesztcellán, ügyelve arra, hogy a minták szobahőmérsékletűek legyenek és a két mérés között a minták légmentesen le legyenek zárva, hogy a száradást elkerüljék. A mérések során rögzítették a reflexiós tényezőket 1-501 MHz-es tartományban, a minta hőmérsékletét és tömegét, illetve az amerikai szabványnak megfelelő szárítószekrényes mérések eredményeit. A minták mennyiségi adatait a következő 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat A sztenderdizációhoz használható minták adatai

Faj	Mintasám, db	Nedvesség tartomány, %	Fajta, db
Szója	55	8 - 22	1
Cirok	12	12 - 16	1
Napraforgó	19	6 - 21	1
Kukorica	58	10 - 37	1
Zab	19	8 - 15	1
Búza	54	7 - 20	5
Árpa	59	8 - 14	2
Rizs	52	9 - 26	4

A sztenderdizációhoz lehetőség szerint gömbölyű szemű fajt akartunk választani. Ilyen a szója és a cirok. Mivel a szójából több mérés állt rendelkezésre és szélesebb nedvességtartományban, ezért a szóját választottuk a sztenderdizációs anyagok kutatásához.

4.3.2.2 Szervetlen szilárd anyagok

Természetesen felmerült olyan szervetlen anyagok használatának az igénye, amelyek időben nem változnak. Olyan anyagoké, amelyek könnyen beszerezhetők, a gyártási reprodukálásuk kedvező, mechanikailag és kémiaiilag tartósak, nem nedvszívók és permittitásuk a gabonához

közél áll. Nem használható szilárd tömbanyag, mert a tesztcellák mérete különböző, és a méretre vágás nehézkes lenne. Ezért a sztenderdizációhoz granulált anyagokat kerestünk.

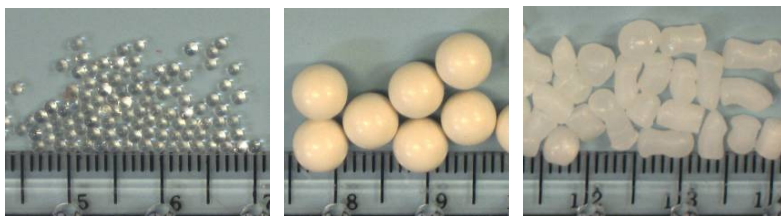
Az irodalomban nem találtunk ilyen anyagokat. Kutatásaink során a kereskedelemben három alkalmas sztenderdizációs anyagot találtunk.

1. "Lead free soda lime glass grinding beads 1,2 mm" magyarul ólommentes üveggolyó, amit daráláshoz használnak, átmérője 1,2 mm, továbbiakban üveggolyók.

2. "SoftAir by Crosman", magyarul a légfegyverekben használt műanyag töltények 6mm átmérővel, gyártója Crosman, továbbiakban amo.

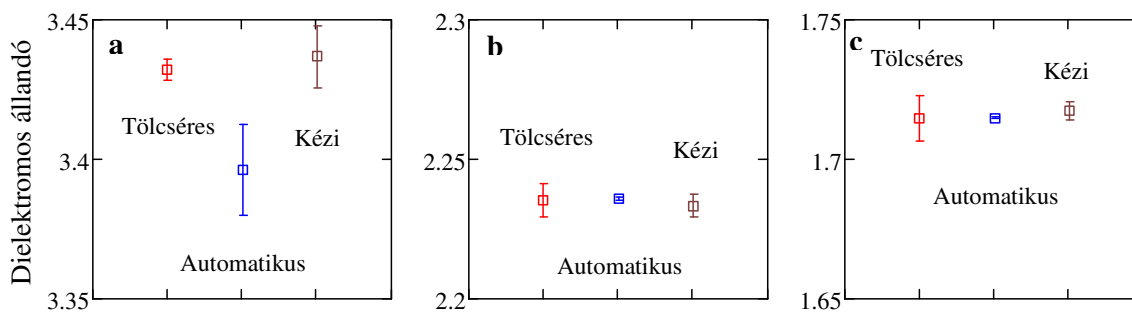
3. "Stuffing plastic pellets", magyarul csomagoláshoz használható műanyag szemcsék, továbbiakban műanyag szemcsék.

A 26. ábra ezeket az anyagokat mutatja. Az M4. mellékletben láthatók a kereskedelmi kiszerezéseik.



26. ábra Sztenderdizációs anyagok balról jobbra: üveggolyók 1,2 mm átmérővel, amo és műanyag szemcsék;

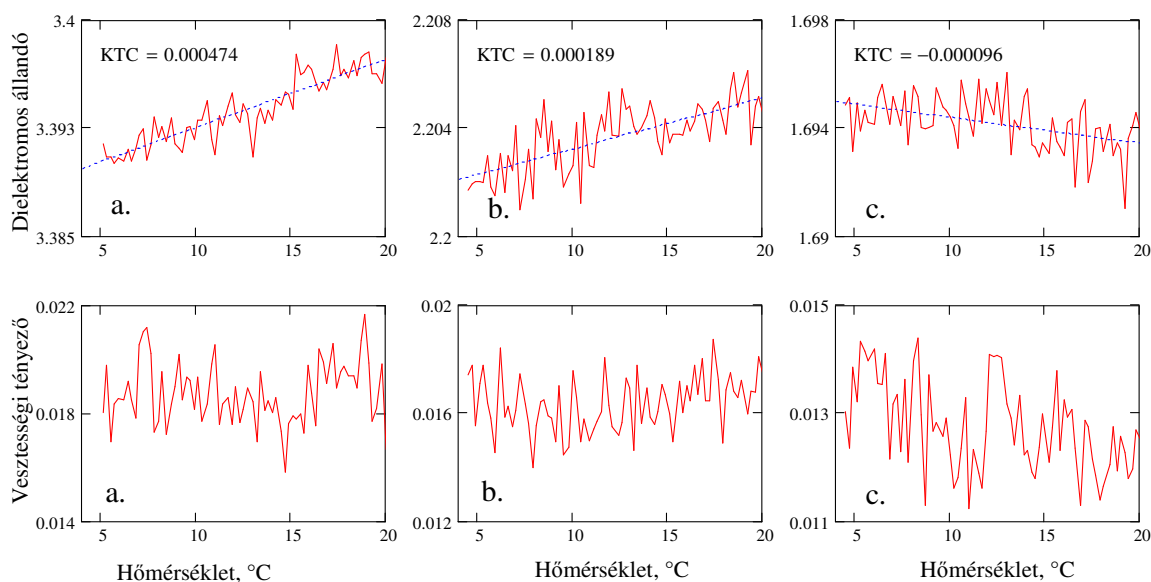
A sztenderdizációs anyagoknak kis variációt kell mutatniuk a betöltések során, és fontos, hogy a különböző betöltéssel a sűrűségkorrigált dielektromos állandó számottevően ne különbözzön. Ahhoz, hogy a sztenderdizációs anyagok alkalmasságát ellenőrizzük előméréseket végeztünk. Mértük ezen anyagok dielektromos állandóit háromszoros ismétléssel a három fentebb ismertetett betöltési móddal: tölcséres, automatikus és kézi. Az eredmények a 27. ábrán láthatók. A vonalak a 95%-os konfidencia intervallumokat, a négyzetek az átlagokat jelölik.



27. ábra A szervesen szilárd anyagok sűrűségkorrigált dielektromos állandói különböző betöltéssel
a: üveggolyók, b: amo, c: műanyag szemcsék

Az üveggolyók a dielektromos állandóban 0,036 eltérést mutatnak az automatikus és a tölcséres betöltés között, aminek vagy valamilyen nagyfokú elrendeződésbeli különbség az oka, vagy az automatikus betöltés során a nagy súlyú üveggolyóminta a bezúdulási sebesség miatt deformálta a cellát. A többi anyag nem mutatott eltérést.

A másik fontos feltétel, hogy ezek az anyagok sztenderdizációs anyagként használhatóak legyenek, hogy ismert legyen a hőmérsékletfüggésük. Ehhez egy erre rendszeresített hőszigetelt cellába (prototípus V.) helyeztük a mintákat, hagytuk 4 °C-ról szobahőmérsékletre melegedni, amely 2-3 óra alatt zajlott le. Mértük a minta hőmérsékletét és 0,2 °C-onként a komplex reflexiók tényezőit. A hőmérséklet mérése üvegszálal Luxtron Fluoroptic hőmérővel történt. A dielektromos állandók és veszteségi tényezők a 28. ábrán látható módon alakultak. Az ábrákon KTC-vel jelölve a minták dielektromos hőmérsékleti tényezője látható.



28. ábra Szervetlen szilárd sztenderdizációs anyagok dielektromos állandójának és veszteségi tényezőjének hőmérsékletfüggése, KTC a hőmérsékleti tényező,
a: üveggolyók, b: amo, c: műanyag szemcsék

A 28. ábrán jól látható, hogy ezen anyagok dielektromos jellemzőinek hőmérsékletfüggése elhanyagolható.

A előmérések alapján ezek az anyagok ígéretesek, mivel kielégítik a velük szemben állított követelményeket. De mivel ezen anyagok veszteségi tényezője közel nulla, míg a gabonáké 0,2 és 1,5 között változik, kérdéses, hogy alkalmasak-e a sztenderdizációhoz.

4.3.3 Betöltési hatások vizsgálatához használt gabonák

A méréseink során hét, Magyarországon termesztett gabonafajt (árpa, búza, kukorica, napraforgó, repce, szója és zab) használtunk. A méréseket alapvetően száraz mintákon végeztük,

ami azt jelenti, hogy több hétig nyitott edényben tároltuk, szabadon érintkezhetett a labor levegőjével, így kialakult az egyensúlyi nedvesség. A cél az volt, hogy a hosszadalmas mérés közben a minta ne száradjon. A mérést megismételtük nedvesített mintákon is, hogy képünk legyen a hatás esetleges nedvességfüggéséről.

A minták nedvességtartalmát és a mérések számát a száraz mintákra a 4. és nedves mintákra az 5. táblázat tartalmazza.

4. táblázat A betöltések hatásának vizsgálatához használt száraz minták

Száraz minták	Nedvesség, %	Mérések száma		
		Tölcsér	Kézi	Automatikus
Árpa	7,7	19	19	19
Búza	7,5	29	29	29
Kukorica	9,5	17	17	17
Napraforgó	3,7	16	16	16
Repce	4,9	18	18	18
Szója	5,8	19	19	19
Zab	6,7	27	27	27

5. táblázat A betöltések hatásának vizsgálatához használt nedves minták

Nedves minták	Nedvesség, %	Mérések száma		
		Tölcsér	Kézi	Automatikus
Árpa	13,9	18	18	18
Búza	18,9	20	20	20
Kukorica	12,3	19	19	19
Napraforgó	12,2	20	20	20
Repce	6,0	10	10	10
Szója	12,0	17	17	17
Zab	19,5	18	18	18

A visszanedvesítést az irodalomban elfogadott módszer szerint végeztük (Nelson 1981). A mintákhoz desztillált vizet adtunk, majd a mintákat jól szigetelt edényekben hűtőben tároltuk több mint egy hétig. A mintákat naponta többször alapos forgatással kevertük, hogy elérjük az egyenletes nedvességet.

A száraz minták nagyon szárazak, a kukorica és a repce esetén a nedves minták nedvességtartalma pedig nem megfelelő mértékben eltérő a száraz mintához képest. Ezeket a tényeket a következtetések során figyelembe vettük.

4.3.4 Kalibrációátvitel

A kalibráció átvihetőségének vizsgálatához a 3. táblázat által ismertetett gabonákat használtuk. A mérések két tesztcellán, a mester és a prototípus tesztcellán, kétféle betöltéssel

történtek. Ezen mérések alapján vizsgálható a kalibrációátvitel hatékonysága a mester tesztcelláról egy gyakorlatban alkalmazható méretű tesztcellára, amelyen vagy tölcéses, vagy automatikus betöltést alkalmaznak. Továbbá vizsgálható a betöltések hatásának különbsége két különböző méretű tesztcellán, és a kalibráció átvihetőségének lehetősége, ha a kalibráció automatikus betöltéssel történt volna.

4.4 KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK

4.4.1 Tesztcella-konstrukciók és modellalkotás

A modellek megalkotása az irodalmi részben ismertetett elméletek felhasználásával történt. A cella elektromos paramétereinek számolásához numerikus módszereket használtunk, mivel az irodalmi részben ismertetett integrálok (56-59) számolása igen körülményes. A numerikus módszerekkel kapcsolatban a USDA-GIPSA kívánsága volt, hogy ne drága szoftvert használjunk, ami a gyártók számára nem elérhető, hanem fejlesszünk vagy ingyen hozzáférhető szoftvert találjunk.

A numerikus szimulációkhoz az ATLC (Kirkby 1996; Kirkby 2004) (Arbitrary Transmission Line Calculator, Tetszőleges tápvonal számoló) és FEMM (Meeker 2005) (Finite Element Method Magnetics, végeselemes módszer mágneses rendszerekhez) programokat találtuk és teszteltük.

Az ATLC véges differenciák módszerével számol, a bemenő adat a tesztcella keresztmetszetének bitmap (bitkép) képe. A program használatának a korlátja a bitmap kép felbontásában van. Ha egy geometriai méretet nem lehet egész számú pixellel ábrázolni, akkor két lehetőség van. Az egyik, hogy arányosan nagyítjuk a képet, hogy egész számú pixelnyi (elemi képrész) legyen az adott méret. Ennek két hátránya van. Az egyik, hogy akkor egy másik méret nem lesz egész számú pixelnyi, másrészt a kép méretének növelésével exponenciálisan nő a számítási idő. A másik lehetséges megoldás, hogy több képet készítünk a problémás méreteknél, ahol nem lehet egész számú pixellel ábrázolni. A képeken az adott részt a legközelebbi nagyobb és kisebb egész pixelszámmal ábrázoljuk. Az eredményt pedig a két részeredmény interpolációjából kapjuk.

A FEMM végeselemes módszer, amely lehetőséget kínál arra, hogy mint egy CAD programban elkészítsük műszakirajzszerűen a tesztcella keresztmetszeti képét, vagy az ún. Lua nyelven programozzuk a rajzolást, a hálókészítést és a számolást. Ennek nagy hasznát vettük az eredmények hálósűrűség konvergenciájának ellenőrzésében, és a különböző dielektromos állandókkal való automatikus számolásokhoz. Az általunk elkészített programok segítségével csak a cella paramétereit kell felsorolni tetszőleges számú variációban, majd a program automatikusan kiszámolja a keresett paramétereket. A program korlátja, hogy csak valós értékekkel számol, nem

lehet komplex permittivitást megadni, és a szkinhatást sem veszi figyelembe, de ezeket a hatásokat más módszerrel figyelembe lehet venni.

A cellák diszkontinuitásait szerettük volna kísérletileg is vizsgálni impulzus-visszhang alapú reflektométerrel, de ilyen kis térbeli felbontású műszert nem találtunk egész Közép-Európában.

4.4.2 A tesztcella dielektromos kalibrációja

A dielektromos kalibráció célja, hogy egy tesztcella modelljének megfelelő paramétereit ismert permittivitású anyagok mérésével meghatározzuk. Az eljárás végeztével a cella valamilyen hibahatáron belül képes ismeretlen permittivitású minta permittivitásának mérésére.

A kalibrációt a mester tesztcellán végeztük el. A kalibráció elvégzésére azért volt szükség, mert az eredeti kalibráció az árnyékoló lemez nélkül történt. Az alkohommérés menete a következő volt. A méréshez a mester cellát szigeteltük, hogy a folyadék ne szivároгjon ki. Az alkoholt a cellába töltöttük. A szintretöltés mutatott némi bizonytalanságot a felületi feszültség miatt kialakuló meniszkusz miatt. Méréseket végeztünk a folyadék mennyiségének kis változtatásával, és az eredmények azt mutatták, hogy a szint ezen kis bizonytalansága nem okozott számottevő hibát.

4.4.2.1 Célfüggvények

A kalibráció lényege, hogy optimalizációs eljárással meghatározzuk a modell megfelelő paramétereit. Az optimalizáció az általunk illeszteni kívánt értékek különbségének a minimalizálását jelenti. Ezek az értékek alkohol kalibráció esetén a különböző alkohokok elméleti permittivitása és a modellel számolt permittivitás. Az optimalizáció matematikailag egy jól megválasztott célfüggvény értékének minimalizálását jelenti. A célfüggvény ilyen esetben legtöbbször az eltérések négyzetének az összege. Ezt szokás legkisebb négyzetek módszerének nevezni.

A mi esetünkben az értékek komplex számok. Elvileg lehetőség van arra, hogy a valós és képzetes részeket külön súlyozzuk a célfüggvényben. Ennek akkor van értelme, ha a valós és képzetes rész értéke nagymértékben különbözik. Mi ezt nem tettük, hanem a permittivitás különbségek abszolút értékeinek a négyzetösszegét használtuk.

A megfelelő modellparaméterek optimalizálásához több dolgot kellett figyelembe venni, több választási lehetőségünk volt, hogy a célfüggvényben mi is szerepeljen:

Az anyagokat tekintve:

- Figyelembe vegyük-e a levegőt (üres tesztcella) vagy sem.
- Figyelembe vegyük-e a képzetes részt vagy sem. (A nedvesség meghatározásához csak a permittivitás valós részét a dielektromos állandót használjuk.)

A mérést tekintve:

- Hány frekvenciát és mely frekvenciákat vegyük figyelembe.
- Mely mérési módokat (illesztett, rövidzár, nyitott) vegyük figyelembe. Ha a modell minden módban működik, akkor biztosak lehetünk, hogy a megfelelő paramétereket találtuk meg, és nem csak egy matematikai lokális minimumot találtunk az optimalizáció során.

Modellt tekintve:

- Hány változót és mely változókat változtassuk a modellben.

Logikus cél, hogy a tesztcella széles frekvenciatartományban különböző mérési módokban pontos eredményt szolgáltatson a komplex permittivitásra. Az elővizsgálatok alapján viszont beláttuk, hogy modellünk további fejlesztése szükséges, hogy több módban is azonos paraméterekkel azonos eredményt kapjunk. A kalibrációnál figyelembe vettük az üres cellát. A paraméterek meghatározásánál a számítási idő csökkentése érdekében csak négy frekvenciát vettünk figyelembe: 51, 89, 127 és 165 MHz-et. A frekvenciatartomány választása azért lett ez, mert 50 MHz felett igazán megbízható a mérés, és 180 MHz felett pedig számos esetben eddig nem feltárt zavaró hatások jelentkeztek, valószínűleg az árnyékoló lemez miatt. Hogy mely tesztcella-paramétereket optimalizáltuk, azt az eredmények részben tárgyalom.

A célfüggvény a becsült és az elméleti komplex permittivitásérték közti különbségek abszolút értékének négyzetösszege volt:

$$F_{\text{cél}}(p) = \sum_{\text{alkohol}} \sum_{\text{frekvencia}} \left[\left| \varepsilon_{\text{becsült}}(p) - \varepsilon_{\text{elméleti}} \right| \right]^2 \quad (74)$$

ahol $F_{\text{cél}}$ a célfüggvény, p az optimalizálni kívánt paraméterek vektora, frekvencia a 51, 89, 127 és 165 MHz-hez tartozó eredmények indexe.

Az illesztés jóságának jellemzésére több módszer is van, mi a közepes négyzetes eltérést (Root Mean Square Error = RMSE vagy RMSEC) használtuk, mert több görbére illesztettünk egy időben ezért az egyes görbék esetén az eltérések átlaga nem nulla.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (y - y_v)^2}{n}} \quad (75)$$

ahol y a becsült érték, y_v a elméleti érték, n a mérési eredmények száma.

4.4.3 Sztenderdizáció

A sztenderdizáció során egy adott cella által mért permittivitást tekintünk referenciának. A sztenderdizációs és a kalibrációs eljárásokban az a közös, hogy mindkét esetben a modell paramétereit keressük optimalizálással.

A nedvességmérés szempontjából az alapcél, hogy a referenciának tekintett mester tesztcellával 149 MHz-en mért dielektromos állandóval való egyezés a lehető legjobb legyen. A sztenderdizáció módszerének kiválasztásánál ugyanazok a kérdések merültek fel, mint a kalibrációnál. Nagyobb szabadság van viszont az anyagok kiválasztásában, amint feljebb ismertettem, mert nem kell, hogy ismert legyen az anyag permittivitása.

Az általunk választott lehetséges sztenderdizációs eljárások, amelyeket az eredmények részben hasonlítottunk össze:

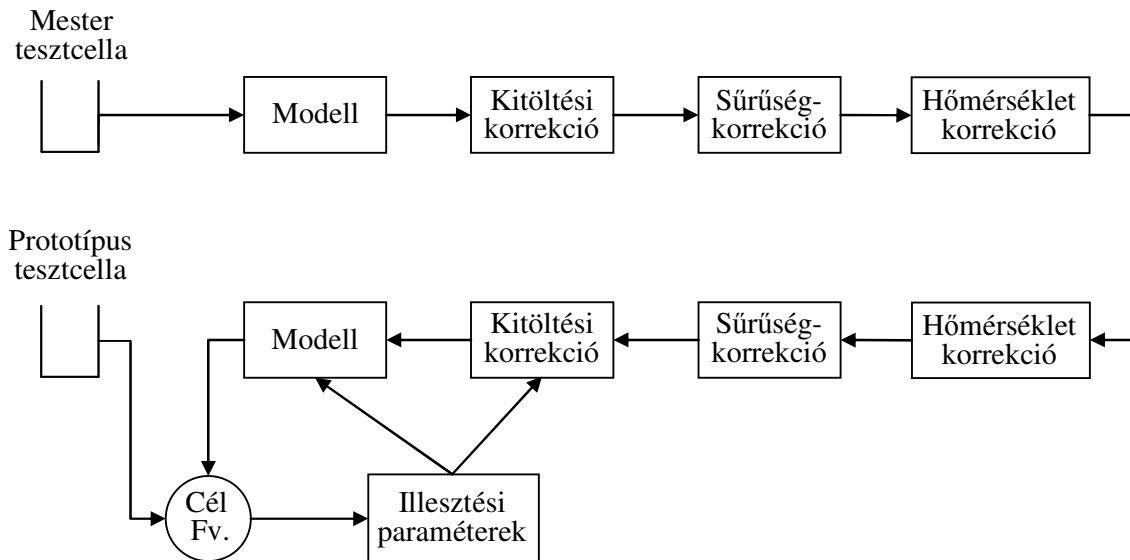
1. A legkézenfekvőbb és gyakorlatban is alkalmazott módszer, hogy gabonákat használunk, csak a 149 MHz-es mérőfrekvenciát. Egy kereskedelmi forgalomban lévő műszer csak egy adott mérőfrekvencián képes mérni, és csak a dielektromos állandó pontossága a cél.
2. Jövőbeli - a világ különböző pontjain lévő - mester tesztcellák közötti sztenderdizációra a szervesen sztenderdizációs anyagok nagyon előnyösek lennének. Mivel eddig csak három anyag állt rendelkezésre, csak a dielektromos állandó és egy frekvencia matematikailag nem elég négy tesztcellaparaméter meghatározásához. Ezért a komplex permittivitás felhasználásával, és a kalibrációnál is alkalmazott frekvenciákon sztenderdizálunk.
3. Ugyancsak gabonát használunk, de a 2. pont szerint a komplex permittivitás alapján a kalibrációnál is alkalmazott frekvenciákon optimalizálunk. A fő cél, hogy összehasonlítsuk a kis veszteségi tényezővel rendelkező szervesen szilárd anyagok és a gabonák eredményességét, azonos módszer esetén.

4.4.3.1 Adott frekvencián, több mintával végzett sztenderdizáció

A paraméterek optimalizálásával a két tesztcella által szolgáltatott nedvességmérési eredmények eltérésének minimalizálása volt a cél. Mivel a nedvességszámítás alapja a 149 MHz-en mért sűrűségkorrigált dielektromos állandó, és a nedvességszámítási algoritmus csak a minta hőmérsékletét tartalmazza, mint minta specifikus műveletet, ezért elegendő a sűrűség és hőmérsékletkorrigált dielektromos állandó eltérését minimalizálni.

Mivel a dielektromos állandó számítása iteratív módon történik, az optimalizáció is önmagában egy iteráció, így ebben az esetben ez egy iterációban iterációnak (több szintű iterációnak) adódott, ami igen időigényes, ezért az optimalizációt két lépésben végeztük. Az alkalmazott program a M5. mellékletben található.

Első lépés, hogy az iterációt kikerüljük, nem a dielektromos állandó eltéréseinek minimalizálása volt a cél, hanem a mester tesztcellával mért komplex permittivitásból számolt komplex reflexiós tényező. Az eljárás folyamatábráját a 29. ábra mutatja:

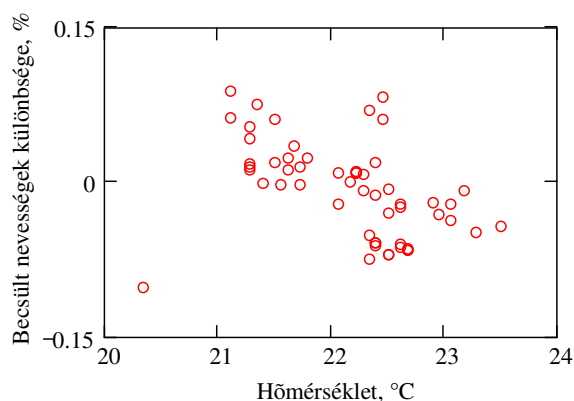


29. ábra A gabonamintákkal történő sztenderdizáció algoritmusának első lépése

A hőmérsékletkorrekció okozott némi problémát, mert az algoritmusban ez a becsült nedvességen történik, ebben az eljárásban pedig csak a sűrűségkorrigált permittivitást használjuk. Ezért szükséges volt egy összefüggés, amellyel a permittivitáson elvégezhető a hőmérsékletkorrekció. Ezt a nedvességen történő hőmérsékletkorrekcióból bonyolult matematikailag származtatni, mert a dielektromos állandó és a nedvességtartalom közti összefüggés egy 5-öd fokú polinom, aminek az inverz függvényét nem triviális megtalálni. Ezért csak egy egyszerű meggondolás alapján jártunk el, miszerint a dielektromos állandó és a nedvességtartalom közti kalibrációs összefüggés meredeksége a 10-20%-os nedvességtartományban 1/6. Ezért a következő képlettel korrigáltunk:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_m - \frac{KTC}{6} \cdot (T - 25) \quad (76)$$

ahol ε_t a hőmérsékletkorrigált dielektromos állandó, ε_m a mért dielektromos állandó, KTC a VHF-UGMA hőmérsékletkorrekció az adott gabonafajra, T a minta hőmérséklete Celsius fokban. A 30. ábra ennek a hőmérsékletkorrekciónak a jóságát mutatja. Az ábra a (76) képlettel számolt dielektromos állandóból származtatott nedvesség és az eredeti módon számolt nedvesség különbségét mutatja.



30. ábra A permittivitáson és a becsült nedvességen történt hőmérsékletkorrekcióval számolt nedvességtartalom eltérése

Az eljárás nem tökéletes, de ezzel a módszerrel csökkenthető az eredmény átlagos eltérések hibája.

Második lépésben a sűrűség- és hőmérsékletkorrigált dielektromos állandó eltéréseinek a minimalizálása volt a cél az ürescella-korrekció paramétereinek optimalizálásával. Ehhez már nem kellett a permittivitást újraszámolni, így az optimalizáció gyors volt.

Az eljárás nagyon hatékonynak bizonyult sok minta esetén, de nem állítható, hogy ez az egyetlen és legjobb módszer.

4.4.3.2 Több frekvencián, kevés mintával végzett sztenderdizáció

A sztenderdizációs eljárás esetében a célfüggvény ugyanaz volt, mint a kalibráció esetében (74), azzal a különbséggel, hogy a célfüggvényben a sűrűség- és hőmérsékletkorrigált permittivitások szerepeltek.

4.4.4 Betöltési módszerek vizsgálatának kiértékelése

A betöltések vizsgálatánál száraz és nedvesített mintákat használtunk (4. és 5. táblázat). A nedvességtartalom meghatározásához természetesen a VHF-UGMA módszer alkalmaztuk.

A nagyszámú mérés elvégzése után láttuk, hogy az eredményekben a vártnál több kiugró adat volt. Ezek okai a tömegmérés és a reflexiós tényező mérésének durva hibái lehettek. A tálca eltávolításának hiánya, tárazás hiánya. A kiugró adatokat eltávolítottuk. Az eredmények és kiugró adatok részletesen a M6. mellékletben található.

A mérési eredményekben megfigyelhető volt a száradás. A mérések értékelése előtt a száradásból eredő trendet lineáris transzformációval eltávolítottuk, amivel az eredmények átlaga nem változott, de a szórások értékei így csak a mérésből eredő hibákat jellemzik.

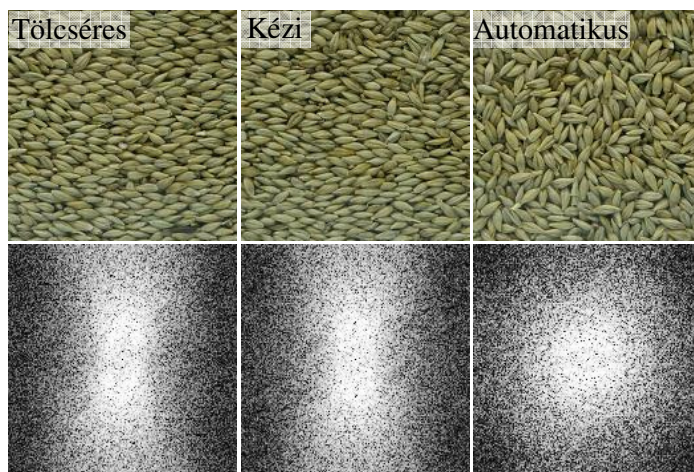
4.4.5 A szemek térbeli orientációja

A gabona orientációját fényképek segítségével tanulmányoztuk. Az oldalképeknél átlátszó dobozt használtunk. A doboz hasonlóan lett kialakítva, mint a tesztcella (M7. melléklet). A felülnézeti fényképeknél a cellát nem töltöttük meg teljesen, és úgy készítettük a felvételt.

Az oldalnézeti képeken a szemek orientáltsága nyilvánvaló, viszont a felülnézeti képeknél szükség volt a szemek orientáltságának bizonyítására. Az orientáció irányának és mértékének szemléltetésére a 2 dimenziós Fourier transzformált (továbbiakban: 2D Fourier transzformált) bizonyult alkalmasnak, amely egy kép szinuszos összetevőinek együtthatóit adja meg. Az együtthatók helyei jellemzik a szinuszos hullám irányát és frekvenciáját. Az általunk használt 2D Fourier transzformált képeken a középpontból a kép szélei felé nő a frekvencia. A szinuszos összetevő iránya a középpont és az adott szinuszos összetevő együtthatójának helye által meghatározott iránnyal egyezik meg. Az alkalmazott algoritmus a M8. mellékletben látható.

A 2D Fourier transzformációhoz egy négyzet alakú képre volt szükség. A felülnézeti képen csak kis négyzetek vágathók ki a tesztcella mérete miatt, és amiatt, hogy a lemezekhez közeli szemeket nem vehettük figyelembe, mert azok iránya a lemez hatása miatt eltér. Ezért a felülnézeti képből 14 db képet vágunk ki, és ezek 2D transzformáltjait átlagoltuk. A feldolgozás lépési az M9. mellékletben látható.

A 2D Fourier transzformált egy olyan szürkeárnyalatos képet eredményezett, amin a "fehér" pontok felhőjének formája jellemzőnek bizonyult a gabonaszemek orientációs tendenciáinak jobb vizualizálására. A módszer működését nem elemeztük matematikailag, hanem az oldalnézeti képek és azok 2D Fourier transzformált képeinek összevetésével a 31. ábra és M10. M11. mellékletekben látható további képek alapján a módszer hatékonyságát bizonyítva láttuk.



31. ábra Oldalnézeti képek és azok 2D Fourier transzformáltjai a három betöltésre

A 31. ábra alapján nyilvánvaló, hogy a tölcséres és a kézi betöltés esetében a gabonaszemek irányultsága horizontális, míg automatikus betöltés esetén a szemek rendezetlenek. Ennek megfelelően a 2D Fourier transzformált képek az első két esetben függőlegesen elnyújtottak, míg a harmadik esetben közel körszimmetrikusnak adódott.

5 EREDMÉNYEK

A kutatásom fő célja az új nedvességmérési kalibráció (VHF-UGMA) átvihetőségének megoldása volt különböző kialakítású tesztcellákra. A megoldáshoz egyrészt szükséges volt, hogy megfelelő tesztcellamodell legyen, amely biztosítja a nedvességszámítás alapjául szolgáló dielektromos állandót, a másik, hogy a gabona tulajdonságai ezt lehetővé tegyék.

Az eredmények hat fejezete három tartalmi egységre osztható. Az első a tesztcellákkal kapcsolatos eredmények (1., 2. és 3. fejezet), a második a gabona betöltésével kapcsolatos eredmények (4. és 5. fejezet), végezetül a harmadik a kalibrációátvitel eredményeivel (6. fejezet) foglalkozik.

5.1 TESZTCELLA-KONSTRUKCIÓK

Az irodalmi összefoglalóból kiderült, hogy a kutatás ott tartott, hogy rendelkezésre állt egy mester tesztcella és egy új algoritmus három év adatai alapján, amely a legígéretesebb nedvességmérési módszernek mutatkozott. Számos kérdés vetődött fel, amelyeknek megválaszolása elengedhetetlen volt, hogy ebből valóban egy új gabonanedvesség-mérő család legyen. A fő kérdés viszont az volt, hogy lehetséges-e a mester tesztcellán fejlesztett kalibráció átvitele más, a kereskedelmi forgalomban alkalmazható méretű tesztcellára.

Ezzel kapcsolatban az eredeti célunk az volt, hogy a kalibráció a lehető legtöbbféle tesztcellára átvihető legyen, ezzel megteremtve a lehetőséget, hogy a gyártók teljesen szabadon tervezzenek cellát, és a mérési eredmények a mester tesztcellával azonos eredményt adjanak. Az elektromágneses tulajdonságok miatt viszont a választás nem lehet teljesen tetszőleges.

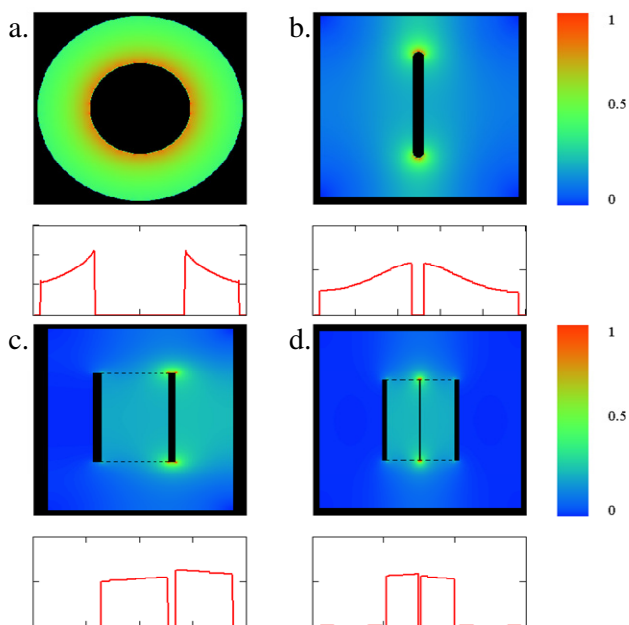
Az összes lehetséges tesztcellát költség- és időtakarékosság miatt nem építettük meg. Gyakorlati és elméleti megfontolások alapján határoztuk meg a kutatás folytatása során alkalmazott tesztcella-konfigurációkat, valamint ajánlásokat a cellák tervezéséhez és kivitelezéséhez.

5.1.1 Tesztcella típusok és konfigurációk

Az első lépés a tesztcellaelektrodák legelőnyösebb konfigurációjának meghatározása. Négy típus jött szóba, ezeket a véges differenciák módszerével számolt elektromos tér eloszlását is feltüntetve a 32. ábra mutatja.

Az első a koaxiális elrendezés (32. ábra a), ahol a gabona két hengerszimmetrikus elektróda között helyezkedik el. Ezt az elrendezést többen is használják a dielektromos állandó mérésére folyadékok esetében. Előnye, hogy teljesen árnyékolt, nincs kisugárzás, ezért nagyobb frekvenciatartományban lehet méréseket végezni, és matematikailag könnyű számolni az elektromos tér tulajdonságait. Hátránya, hogy nehezen megoldható a gabona betöltése a cellába, másrészt az elektromágneses tér nem homogén, emiatt a középső elektróda körül, ahol erősebb az

elektromos tér, a gabona nagyobb súllyal járul hozzá a mért eredményhez. Az ebből eredő variancia növekedését Mathews (1963) méréssel igazolta kapacitív tesztcellára.



32. ábra Lehetséges tesztcella keresztmetszetek; a grafikonok az elektromos térerősséget szemléltetik vízszintes középvonal mentén

A második elrendezés egy zárt dobozban lévő lemez (32. ábra b), ahol a gabona a lemez körül a fémdobozt teljesen kitöltve helyezkedik el. Nyilvánvaló hátránya a csúcshatás miatti ún. melegpontok a gabonamintában, ami ugyanazt a variancianövekedési problémát okozza, mint a koaxiális esetben.

A harmadik esetben két elektróda van (32. ábra c), amelyek között helyezkedik el a gabona. Így a melegpont nem a gabonamintában van. Hátránya, hogy az egyik lemezt, amely magasabb potenciálon van csak a külső doboz árnyékolja, ami a fal távolságának esetleges bizonytalansága miatt nem kedvező.

A negyedik esetben a gabona három lemez között helyezkedik el (32. ábra d). A középső lemez van magasabb potenciálon a másik két lemez, mint árnyékolás is szerepet játszik, így a körülvevő doboz pontos helyzete nem játszik légyeges szerepet. Melegpontok sincsenek a gabonamintában. További előnye, hogy a gabona könnyen a cellába tölthető és üríthető.

Ezen megfontolások alapján a kutatásainkban csak az utóbbi esettel foglalkoztunk.

5.1.2 Geometriai méretek

A tesztcella geometriai méreteinek a megváltoztatása megváltoztatja a cella elektromágneses tulajdonságait, ezért egy új tesztcella tervezésekor és megépítésekor fontos, hogy ezek hatásait pontosan ismerjük.

Az első a cellalemez távolságának a hatása. A cella lemeztávolságai nem választhatók meg tetszőlegesen, mivel a lemeztávolság és a magasság aránya az egyik fő tényező, ami a cella hullámimpedanciáját meghatározza. Ennek célszerűen 50 Ω körüli értéknek kell lennie, hogy elkerüljük a felesleges visszaverődéseket a szabványos 50 Ω -os konnektoroknál. A lemezek vastagsága és kis mértékben a lemez éleinek a formája is befolyásolja a hullámimpedanciát. Így a cella tervezésénél a cella lemez magasságához a lemezek vastagságát és formáját is figyelembe véve kell a lemezek távolságát meghatározni.

A cella két végén a csatlakozókból a hullámvezetőbe kis résen lép be az elektromágneses hullám, ezen a szakaszon az elektromágneses tér nem TEM módú, térbelileg tranzienst. A hullámvezető rész hossza, ahol még nincs gabona, eredetileg úgy lett megválasztva, hogy elegendően hosszú legyen, hogy a gabonához érő elektromágneses hullám biztos TEM módban legyen, ezzel ne okozzon modellezési bizonytalanságot. Az előmérések azt mutatták, hogy ennek a szakasznak nem érdemes 3-4 cm-nél rövidebbnek lennie.

Ezen a részen jelentős hatása van a középső lemez és a véglapok távolságának az üres cella reflexiójára. Ha ez a rés túl kicsi, akkor jelentős kapacitás alakul ki a két különböző potenciálú fém között, ha túl nagy, akkor mechanikailag lesz érzékeny. Előmérés is bizonyította, ha ebbe a részbe műanyag tartóelemet helyezünk a mechanikai stabilitás növelése céljából, ezzel is a kapacitást növeljük, és rontjuk a cella karakterisztikáját. Mivel egyelőre ennek a szakasznak a pontos viselkedést nem tudtuk feltárni, ezért a prototípus tesztcellák gyártása során igyekeztünk a mester tesztcellán lévő réshez hasonló rést kialakítani. Egy "tökéletes" tesztcella készítéséhez optimalizálni kellene ennek a résznek a nagyságát.

Tapasztalataink szerint a cella hullámimpedanciája, és ezen keresztül a cellában terjedő hullám viselkedése nagyon érzékeny a gyártási pontosságra, ezért a cellákat úgy alakítottuk ki, hogy a cella lemeztávolsága finoman állítható legyen. Egy adott cella esetén a pontos cellatávolságot a reflexiós tényező minimalizálásával határozzuk meg.

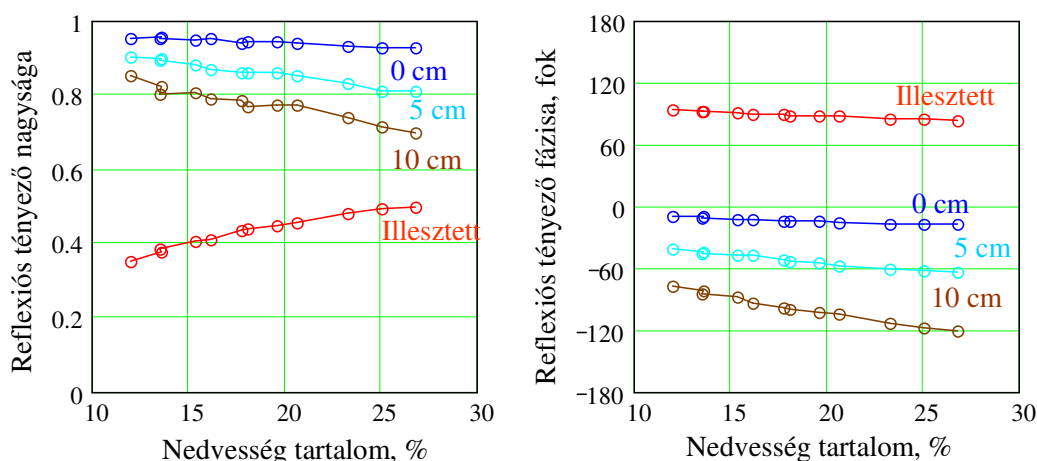
5.1.3 Mérési módok

A cellákban a haladó hullámok tulajdonságait mérhetjük reflexiós vagy transzmissziós módban. A reflexiós mérés esetében a hullám azonos oldalon lép be és lép ki. Ennél az elrendezésnél meg kell választanunk, hogy a cella másik oldalán milyen záróimpedanciát alkalmazunk. Három lehetséges variáció van. Az egyik a már alkalmazott 50 Ω -os illesztett záróimpedancia, melynek eredményeképpen nincs visszaverődés a cella végéről. Továbbá lehetséges a nyitott és a rövidzár lezárás, amelyek ugyancsak megfelelő záróimpedanciákkal lehetségesek. A rövidzár üzemmód megvalósítható úgy, hogy a cella egy merőleges fém lapban végződik. Ez igen olcsó megoldás lenne, és a tesztcellát mechanikailag is stabilá tenné.

A mérési módok kiválasztásánál a fő kérdés, hogy mennyire érzékeny a mért paraméter a gabona nedvességtartalmára. Ennek eldöntéséhez a legegyszerűbb módszer, hogy egy gabonamintát visszanedvesítéssel különböző nedvességtartalomra beállítunk, majd mérjük a komplex reflexiós tényezőt, aminek a változásából következtetni tudunk az adott mérési mód érzékenységére.

Búzaminta felhasználásával visszanedvesítéssel készítettünk egy 12 mintából álló mintasorozatot. A minta cellába töltése után mértük a komplex reflexiós tényezőt illesztett lezárással, és a módszerek részben bemutatott lemezeket a hullámvezető szakaszba helyezve a gabonatarató szakasztól 0 cm, 5 cm és 10 cm távolságra, ezzel valósítva meg a rövidzár üzemmódot.

A következő ábrán (33. ábra) a reflexiós tényező nagysága és a fázisa látható a nedvességtartalom függvényében az illesztett lezárásra és a rövidzárakra, amelyeket 0 cm, 5 cm és 10 cm-re lévő lemezekkel hoztunk létre.



33. ábra A mért reflexiós tényező nagysága és a fázisa különböző tesztcella módokban és különböző nedvességtartalmú búzamintákra

Az eredmények értékelése aszerint történt, hogy mennyire változott meg a mért paraméter, a reflexió nagysága és fázisa, a nedvességtartalom változásának hatására. Minél nagyobb volt a változás, annál érzékenyebb az adott módszer. Mivel a 33. ábra közel lineáris változást mutat, ezért az illesztett egyenes meredekségét tekintettük, mint az érzékenységet jellemző paramétert. Az értékeket a 6. Táblázat tartalmazza.

6. Táblázat Az egyes mérési módok érzékenységét jellemző meredekségek

	Reflexió nagysága	Reflexió fázisa
<u>Illesztett</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,012</u>
0 cm	-0,002	-0,01
5 cm	-0,007	-0,028
10 cm	-0,009	-0,051

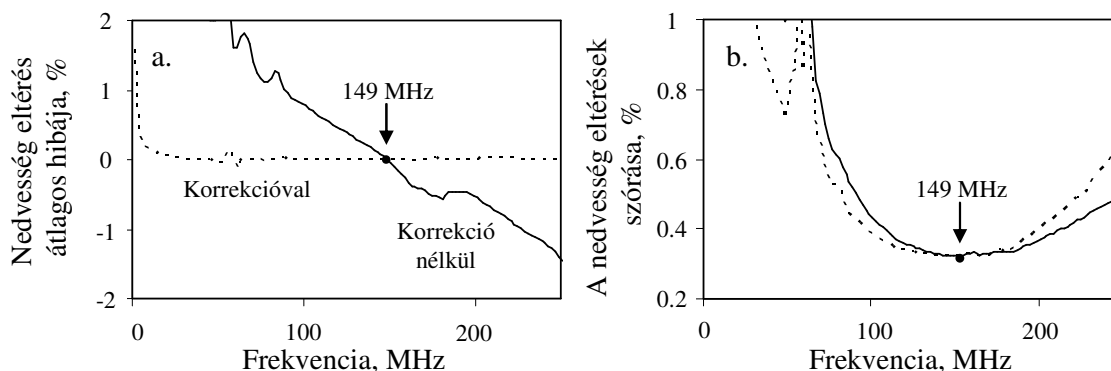
A 6. táblázatban látható eredmények szerint a rövidzár 0 cm-es távolsággal szinte érzéketlen a nedvességtartalomra, de minél hosszabb a rövidzáró lemez távolsága a gabonatartó szakasztól, annál érzékenyebb. Elméleti számításokból ez az érzékenység 25 cm-es hosszig nő. Ez az eredmény azt mutatja, hogy a rövidzár mód alkalmas lehet, de kompromisszumot kell kötni a cella hossza és az érzékenység között.

5.1.4 Frekvencia

A frekvencia megválasztása fontos kérdés, ha nem az eredeti 149 MHz-es mérőfrekvencián szeretnénk a mérőműszert használni. Választ kerestünk arra, hogy adott tesztcellán, mennyire térhet el a választott 149 MHz-től a mérőfrekvencia úgy, hogy az eredmény mégis egyezzen a 149 MHz-en mért eredménnyel.

A kérdés megválaszolásához az eredeti kalibrációhoz használt minták mérési eredményeit két esetre vizsgáltuk. Az első megközelítés az volt, hogy a különböző frekvencián mért reflexiók tényezőiből az eredeti jelfolyamábrás modellel számoltuk a dielektromos állandót, és ebből a VHF-UGMA algoritlussal a nedvességet. A másik megközelítésben mérőfrekvenciánként optimalizáljuk a kitöltési tényezőt és az ürescella-korrekción. Azért választottuk ezt a két paramétert, mert a cella a különböző frekvenciákon a helyes dielektromos állandót adja, viszont a dielektromos állandó a gabona tulajdonságai miatt a különböző frekvenciákon eltérő. Ezzel a módszerrel a nedvesség függvényében egy lineáris transzformációt végzünk a dielektromos állandón. Az ürescella-korrekción eltolást végez, a kitöltési tényező pedig mint meredekségi korrekció működik.

A két megközelítés eredményét, a referencia nedvességtől való átlagos eltérést és az eltérések szórását mutatja a 34. ábra. A folytonos vonal a korrekció nélküli, a szaggatott a lineáris korrekció alkalmazásával kapott esetet ábrázolja.

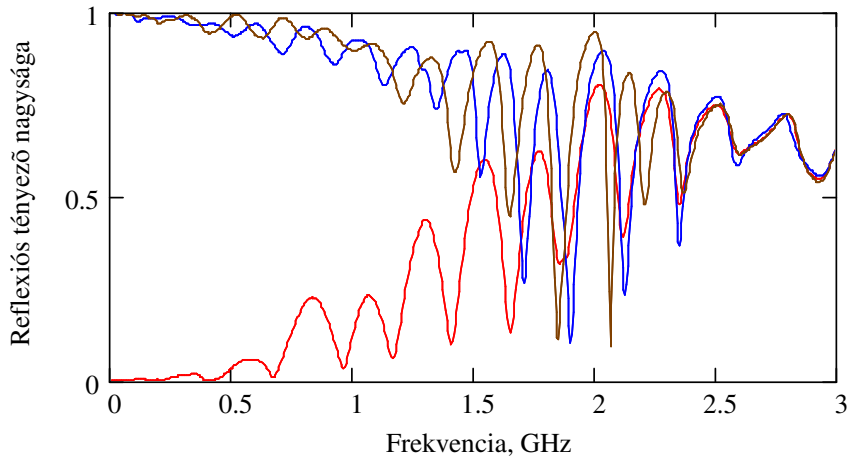


34. ábra A mérőfrekvencia megváltoztatásának hatása, szaggatott vonal: ürescella-korrekción és kitöltési tényező frekvenciánként optimalizálva, folytonos vonal: optimalizáció nélkül

A 34. ábra bal oldalán (a) látható, hogy kis frekvenciaváltozás esetén is jelentős átlagos nedvesség eltérés mutatkozik. Ezzel szemben, ha egyszerű módon, de korrigáljuk a dielektromos állandók

értékét, akkor széles frekvencia tartományban az átlagos nedvességeltérés nullává tehető (szaggatott vonal). A 34. ábra jobb panelén (b) a hibák szórása látható, amelyek azt mutatják, hogy a referencia nedvességtől való eltérés szórása egy kb. ± 30 MHz-es tartományban a 149 MHz-es frekvencián lévő szórással azonos.

Érdekes eredményt mutat a 35. ábra, amely az üres mester tesztcella reflexiós tényezőjének nagyságát mutatja a frekvencia függvényében illesztett, rövidzár és nyitott üzemmódban 3 GHz-ig.



35. ábra Üres tesztcella reflexiós tényezőjének nagysága a frekvencia függvényében;
piros: illesztett, kék: rövidzár, barna: nyitott

A spektrumokon (35. ábra) jól látható, hogy az illesztett üzemmódban a reflexiós tényező nagysága nő, míg a rövidzár és nyitott üzemmódban csökken. Ennek több oka van. Jól látható, hogy 1,5 GHz-nél a görbék összeérnek, majd 2,5 GHz esetén már megkülönböztethetetlenül együtt futnak. Ez azt jelenti, hogy a cella már arra sem érzékeny, hogy milyen módban van. Ez a mérés azt szemlélteti, hogy ilyen típusú cellával kb. 1,5 GHz-es frekvencia felett elvileg is lehetetlen permittivitást mérni.

A TEM módnak van felső frekvenciahatára, ezt nevezik levágási frekvenciának. Ennél magasabb frekvenciákon az általunk alkalmazott modellek nem érvényesek. A levágási frekvencia egyszerű geometriákra adott képletekkel könnyen számolható. A mester tesztcellához hasonló ún. szalagvonalra, amelynél a külső elektródák magassága a belső elektródához képest nagyobb, a levágási frekvencia (Mongia 1999):

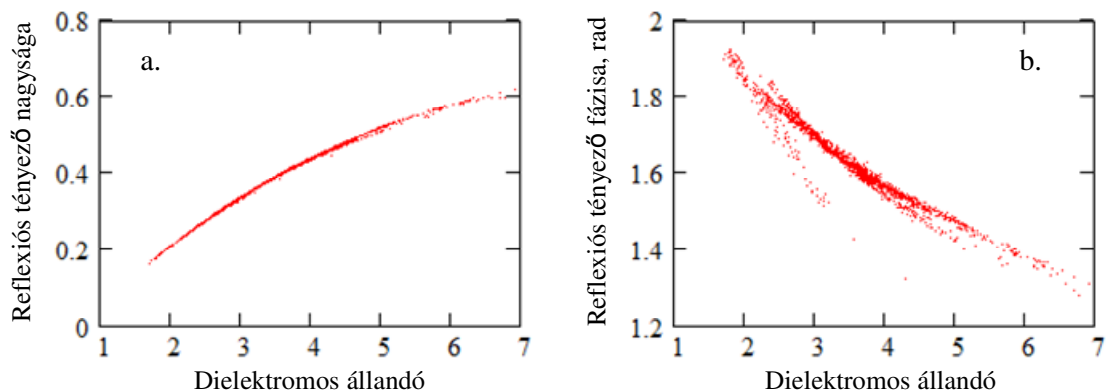
$$f_c = \frac{15}{b \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{1}{\frac{W}{b} + \frac{\pi}{4}} \quad (77)$$

ahol b a két külső lemez távolsága (cm), W a lemez magassága (cm) és ϵ_r a cellában lévő anyag dielektromos állandója. Ezzel a képlettel a mester tesztcellára, a legnedvesebb gabonára ($\epsilon_r=10$) a levágási frekvencia (f_c) 333 MHz-nek adódott, ami azt jelenti, hogy gabonákra kb. 300 MHz felett nem érvényesek a TEM hullámforma tulajdonságait felhasználó modellek. Másrészt, ha a cellában lévő anyag dielektromos állandója nagyobb, mint 50, akkor a levágási frekvencia 150 MHz, ez azt jelenti, hogy a tesztcella kalibrációjához nem lehet nagy dielektromos állandójú anyagot, például vizet alkalmazni.

5.1.5 Csak a reflexiós tényező nagyságának használata

Az eddigiekben a komplex reflexiós tényező alapján matematikai modell segítségével számoltuk a dielektromos állandót. Felmerült viszont egy gyakorlati szempontból nagyon fontos kérdés, hogy a nedvesség mérése történhet-e csak a reflexiós tényező nagyságának a mérésével. Ennek azért van nagy jelentősége, mert egy érzékelő, amely csak a reflexiós tényező nagyságát méri sokkal olcsóbb, mint az az érzékelő, amely a fázist is méri.

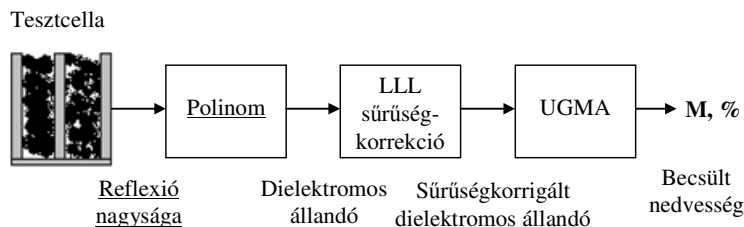
Az első kérdés az volt, hogy a dielektromos állandó milyen összefüggésben van a reflexiós tényező nagyságával. A kérdés megválaszolásához a 2004-2006 között mért gabonák mérési eredményeit használtuk. A mérések felhasználásával a cella eredeti jelfolyamábrás matematikai modeljével számoltuk ki a minták dielektromos állandóját, amelyek függvényében ábrázoltuk a reflexiós tényező nagyságát és a reflexiós tényező fázisát (36. ábra).



36. ábra A dielektromos állandó és a reflexiós tényező nagyságának illetve fázisának összefüggése 2000 gabonamintára, amelyek 18 fajtát reprezentálnak

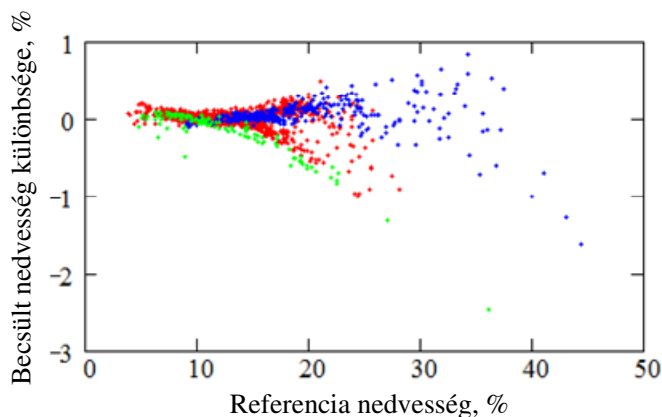
A 36. ábra alapján látható, hogy a dielektromos állandó a reflexiós tényező nagyságával szoros összefüggésben van, míg a fázissal az összefüggés messze nem ilyen szoros. Ez azt jelenti, hogy a dielektromos állandó egy egyszerű összefüggéssel megkapható a reflexiós tényező nagyságából.

A módszer eredményességének meghatározásához összevetettük a kétféle módon kapható nedvességmérési eredményt. A dielektromos állandó számolásához 5-öd fokú polinomot használtunk, amely minden gabonafajtára ugyanaz. Ezt alkalmaztuk, mint "tesztcellamodell", amely a reflexiós tényező nagyságából a dielektromos állandót becsüli. Az így számolt dielektromos állandóra alkalmaztuk az LLL sűrűségkorrekciót és a VHF-UGMA nedvességmérési algoritmust (37. ábra).



37. ábra A csak reflexiós tényező nagyságát használó algoritmus elvi vázlata

A 38. ábrán a polinomiális és az eredeti tesztcellamoddellel kapott nedvességértékek különbségei láthatók.

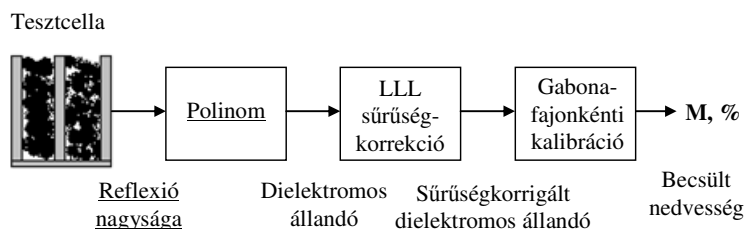


38. ábra A csak a reflexiós tényező nagysága és a komplex reflexiós tényező alapján a VHF-UGMA-val számolt nedvesség eltérése;
kék: kukorica, zöld: napraforgó, piros: a többi 16 gabonafajta

A 38. ábra alapján látható, hogy a polinomiális összefüggéssel számolt dielektromos állandóból az VHF-UGMA-val becsült nedvességeredmény jó egyezést mutat az eredeti módszerrel 15%-os nedvesség alatt. Viszont ennél nagyobb nedvességtartalom esetén az eltérés jelentős. Ez azt jelenti, hogy a módszer ebben a formában nem elég pontos.

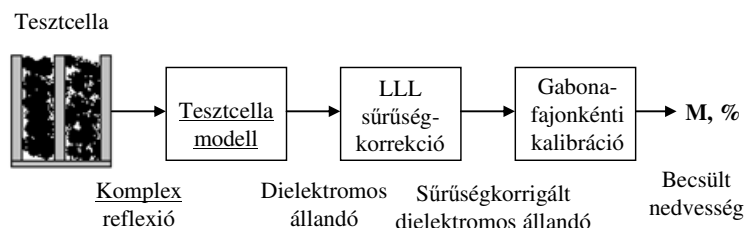
A 38. ábrán az is látható a zöld (napraforgó) és kék (kukorica) pontok alapján, hogy az eltérések gabonafajonként viszonylag szűk csoportokba rendeződnek. Ez azt jelenti, hogy a VHF-UGMA algoritmus okozza az eltérést. Ezt igazolandó gabonafajonkénti kalibrációt alkalmaztunk a

sűrűségkorrigált dielektromos állandón a nedvesség becslésére. Természetesen semmi akadály nem volt, hogy új egyesítő paramétereket is meghatározzunk, de a kérdés megválaszolásához ez nem volt szükséges. A folyamatot a 39. ábra szemlélteti.



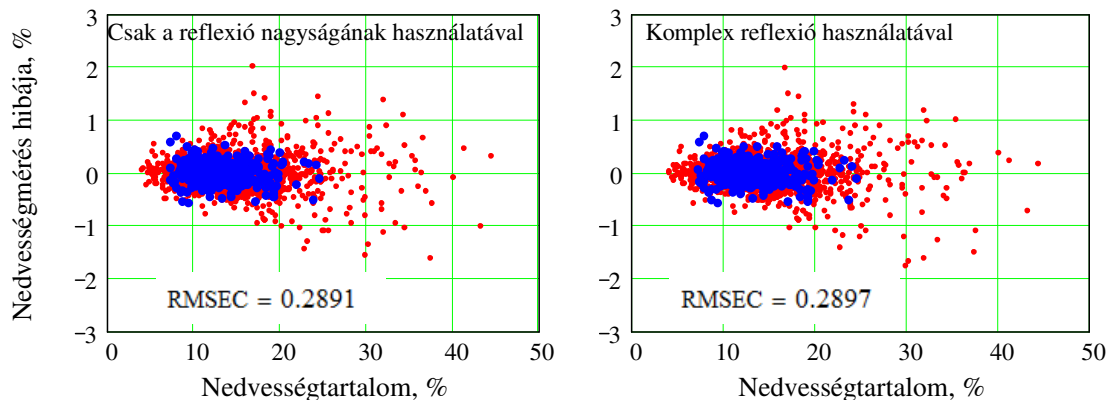
39. ábra A csak reflexió tényező nagyságát és gabonafajonkénti kalibrációt alkalmazó algoritmus

Ez a következőképpen történt. Gabonafajonként meghatároztunk a nedvességmérési kalibrációs összefüggéseket a polinomiálisan kapott sűrűségkorrigált dielektromos állandók és a szárítószekrényes mérések között. Hogy ezt össze lehessen hasonlítani a komplex permittivitást alkalmazó módszerrel, meghatároztuk a nedvességmérési kalibrációs összefüggéseket az eredeti sűrűségkorrigált dielektromos állandók és a szárítószekrényes mérések között (40. ábra).



40. ábra A komplex reflexió tényezőt és gabonafajonkénti kalibrációt alkalmazó algoritmus

A 41. ábrán a reflexió tényező nagyságát és a komplex permittivitást alkalmazó mérési módszerek összehasonlítása látható. Az ábrák a kapott nedvességmérési eredmények és a szárítószekrényes méréssel kapott nedvességek eltéréseit mutatják.



41. ábra A csak a reflexió tényező nagyságával, illetve a komplex reflexió tényezővel számolt nedvesség hibája, a nedvesség gabonafajonkénti kalibrációval számolva

Az 41. ábrán látható RMSEC értékek az mutatják, hogy a csak reflexiós tényező nagyságát használó módszer ugyanolyan jónak bizonyult, mint a komplex permittivitást alkalmazó módszer. Ez azt jelenti, hogy egy megvalósuló nedvességmérő berendezésben elvileg elegendő a reflexiós tényező nagyságának mérése, de akkor a mester tesztcellán újra kell fejleszteni a VHF-UGMA algoritmust a csak reflexiós tényező nagyságát használó esetre.

5.2 TESZTCELLAMODELLEZÉS

A permittivitás meghatározásához szükség van a mért reflexiós tényező és a permittivitás közti összefüggésre. Fizikailag ez az összefüggés meglehetősen bonyolult, de a dielektromos állandó és a reflexiós tényező nagysága között egy egyszerű polinomiális összefüggés is jó eredményt adhat, mint az az előző fejezetben látható volt. A másik lehetőség a fizikai hatásokat leíró modell.

A modellnek több előnye van a közönséges görbeillesztéssel szemben. Mivel kevesebb paramétert kell meghatározni méréssel, ezért kevesebb minta elég egy cella kalibrációjához és sztenderdizációjához. A tesztcella gyártási bizonytalanságából eredő eltérése esetén elegendő a megfelelő modellparaméter megváltoztatása, hogy a helyes eredményt kapjuk, míg a görbeillesztés esetén minden paramétert újra kell számolni. Másrészt a fizikai modell alkalmas széles frekvenciatartománybeli viselkedés leírására, a komplex permittivitás meghatározására, és az extrapolációs megbízhatósága is sokkal jobb.

A célunk az volt, hogy a lehető legpontosabb, és a tesztcella valós paramétereit magában foglaló fizikai modellt alkossunk. A modell jól működjön a lehető legszélesebb frekvenciatartományban és minden üzemmódra úgy, hogy minimális legyen a modellben az illesztési paraméterek száma.

5.2.1 Jelfolyamábrás megközelítés

Funk (2001) eredetileg jelfolyamábrás megközelítést használt. A modell nagyon egyszerű felépítésű volt. A modell csak az első hullámvezető szakaszt és a gabonatartó szakasz rendszerét modellezi. Ezért a hullámvezető szakasz hosszának modellbeli értéke nem egyezett meg a tényleges hosszal, az eredeti modellel nem lehet egyéb üzemmódokat leírni és nem volt alkalmas 50 Ω -tól különböző hullámimpedanciájú cellák leírására. Ennek ellenére nagyon jó egyezést lehetett elérni vele széles frekvenciatartományban a kalibrációs alkoholokon, amely biztosította a modell érvényességét.

A modell fejlesztéséhez először ezt a módszert használtuk. A tapasztalatunk viszont az volt, hogy vagy fáradságosan kellett egyszerűsíteni egy adott mérési módra a modellt, amely nem írt le másik mérési módot, vagy akár 16 egyenletből álló egyenletrendszert kellett megoldani, ami az egészet átláthatatlanná tette.

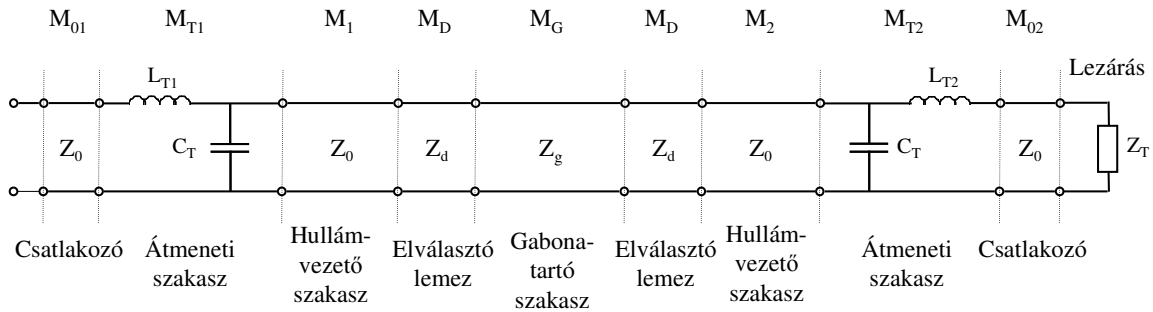
5.2.2 ABCD mátrix megközelítés

Az ABCD mátrixokkal való modellezés egy teljesen új perspektívát nyitott meg. A mátrixokkal viszonylag könnyű egy komplex modell felépítése, mivel az egymás után lévő szakaszok egyszerű mátrixszorzással számolhatók.

A cellák modellalkotása a dolgozatom írása alatt még a kutatás középpontjában állt, ezért a következőkben leírtak nem minden esetben válaszolnak minden felmerülő kérdésre.

5.2.2.1 A modell matematika felépítése

A cella modellezésénél igyekeztünk figyelembe venni minden lehetséges összetevőt, amely szignifikánsan hozzájárul a reflexió kialakításához. Sokféle összeállítást kipróbáltunk, végül a jelenlegi ismereteink szerint az optimális modell 9 szakaszból áll, ami a 42. ábrán látható.



42. ábra Az ABCD modell alapjául szolgáló tesztcella szakaszok

M_{01} és M_{02} a bevezető és a záróimpedancia előtt lévő csatlakozó, M_{T1} és M_{T2} az átmeneti szakaszok a cella elején és végén, M_1 és M_2 a hullámvezető szakaszok, M_D a diektromos anyagból készült elválasztó lemezek, amelyek a gabonát tartják, és az M_G a gabonátartó szakasz. A Z_T záróimpedanciát nem ABCD mátrix művelettel vettük figyelembe.

Az M_{T1} és M_{T2} szakaszokat kivéve, az összes szakasz tápvonalként tekinthető, amelyek különböző hullámimpedanciával és terjedési együtthatóval rendelkeznek. Ezek ABCD mátrixai a következő képlettel adhatók meg:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot d) & Z \cdot \sinh(\gamma \cdot d) \\ \frac{\sinh(\gamma \cdot d)}{Z} & \cosh(\gamma \cdot d) \end{pmatrix} \quad (78)$$

ahol γ a terjedési együttható, d a szakasz fizikai hossza, és Z az adott szakasz hullámimpedanciája.

A γ terjedési együttható a következő képlettel adható meg:

$$\gamma = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \cdot \frac{\omega}{c} \cdot i + \alpha \quad (79)$$

ahol ϵ_{eff} az effektív dielektromos állandó, c a fény terjedési sebessége, $\omega = 2\pi f$, a körfrekvencia, α az általunk bevezetett kisugárzási tényező, amely használata segítette a frekvencia szerinti jobb modellezést. Az ϵ_{eff} az effektív permittivitás, amely ekvivalens azzal a permittivitással, amely a teljes teret töltené ki:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon_m} + 1 + \text{Corr} \quad (80)$$

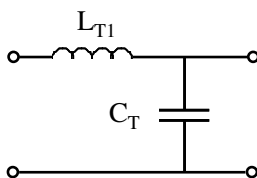
ahol ϵ a minta dielektromos állandója, ϵ_m a kitöltési tényező reciproka, és Corr az üres tesztcella korrekció, ami nagyrészt a gabonartartó fenéklemeze miatt van. Ezt az összefüggést már Funk (2001) is alkalmazta, de az üres tesztcella korrekció a sűrűségkorrekcióban volt, ami nem bizonyult helyes módszernek.

A hullámimpedancia a cella azon szakaszán, ahol az dielektromos anyagot tartalmaz, az üres cella hullámimpedanciájából a következőképpen számolható:

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (81)$$

ahol Z_0 az üres cella hullámimpedanciája, ϵ_{eff} az effektív permittivitás.

Az átmeneti szakasz a tesztcella azon része, ahol a konnektorból a cellába lép az elektromágneses hullám, és ahol a középső lemez és a véglemez közti rés van, aminek a hullámimpedanciája eltérő. Az átmeneti szakasz, mint diszkontinuitás "zavart" visz a rendszerbe, amelynek hatására visszaverődés és fáziseltolódás jön létre. Egy ilyen átmeneti szakaszt egy részleges Y kapcsolással (43. ábra) sikeresen helyettesíthetünk (Kraus 1960).



43. ábra Y helyettesítő kapcsolás az átmeneti szakasz modellezéséhez

Ez matematikailag ugyancsak mátrixok szorzata. Az átmeneti szakasz ABCD mátrixa:

$$\begin{pmatrix} 1 & Z_{T1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Y_T & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + Z_{T1} \cdot Y_T & Z_{T1} \\ Y_T & 1 \end{pmatrix} \quad (82)$$

ahol $Z_{T1} = L_{T1} \cdot \omega$ induktív impedancia és $Y_T = C_{T1} \cdot \omega$ kapacitív admittancia.

A fentebb említett jelölések, az egyes szakaszok ABCD mátrixai, így a teljes szakasz ABCD mátrixa a következőképpen számolható:

$$ABCD = M_{01} \cdot M_{T1} \cdot M_1 \cdot M_D \cdot M_G \cdot M_D \cdot M_2 \cdot M_{T2} \cdot M_{02} \quad (83)$$

A reflexiós vagy akár a transzmissziós tényező számolásához a fenti szakaszok szorzataként előálló ABCD mátrixot (83) át kell konvertálni szórás mátrixszá a következő módon:

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B - C \cdot Z_{01} \cdot Z_{02} + A \cdot Z_{02} - D \cdot Z_{01}}{(B + C \cdot Z_{01} \cdot Z_{02} + A \cdot Z_{02} + D \cdot Z_{01})} & \frac{2 \cdot Z_{01} \cdot (A \cdot D - B \cdot C)}{(B + C \cdot Z_{01} \cdot Z_{02} + A \cdot Z_{02} + D \cdot Z_{01})} \\ \frac{2 \cdot Z_{02}}{(B + C \cdot Z_{01} \cdot Z_{02} + A \cdot Z_{02} + D \cdot Z_{01})} & \frac{B - C \cdot Z_{01} \cdot Z_{02} - A \cdot Z_{02} + D \cdot Z_{01}}{(B + C \cdot Z_{01} \cdot Z_{02} + A \cdot Z_{02} + D \cdot Z_{01})} \end{bmatrix} \quad (84)$$

ahol Z_{01} és Z_{02} a csatlakozó vezetékek hullámimpedanciája, ami szabványosan 50Ω , A, B, C és D az ABCD mátrix elemei, S_{11} , S_{12} , S_{21} és S_{22} a szórás paraméterek.

Ha tesztcellát transzmissziós módban használjuk, akkor az S_{12} a transzmissziós tényezőt adja meg. Ha reflexiós módban használjuk, akkor a reflexiós tényező a következő képlettel számolható:

$$\Gamma = S_{11} + \frac{S_{12} \cdot \Gamma_L \cdot S_{21}}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_L} \quad (85)$$

ahol Γ_L a záróimpedanciának a reflexiós tényezője:

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_{con}}{Z_L + Z_{con}} \quad (86)$$

ahol Z_L a záróimpedancia és a Z_{con} a csatlakozó hullámimpedanciája. Amennyiben illesztett lezárással használjuk a cellát, akkor $Z_L = Z_{con} = 50 \Omega$, így $\Gamma_L = 0$, nincs visszaverődés a záróimpedanciáról, ezért (85) alapján $\Gamma = S_{11}$. A számolások során használt ABCD modell a M12. mellékletben található.

A modell már itt is látható nagy előnye, hogy a különböző mérési módok ugyanazzal a modellel tárgyalhatók; hátránya, hogy a modell impliciten tartalmazza a meghatározni kívánt komplex permittivitást ugyanúgy, mint a jelfolyamábrás modell esetében. Így mindig egy iteráció eredményeként kapható meg a komplex reflexiós tényezőtől a komplex permittivitás. Ez igen jelentősen megnöveli a számítási időt és az alkalmazott algoritmus komplexitását.

5.2.3 A modell paramétereinek meghatározása

Az előző részben bemutatott modell 21 paramétert tartalmaz, és mint általában a fizikai modelleknél, a nagy nehézséget a paraméterek értékeinek a meghatározása okozza. A geometriai méretet képviselő paramétereket természetesen a megfelelő eszközzel könnyű meghatározni, viszont a többi paramétert vagy numerikus számolással vagy kalibrációval lehet megkapni.

A paraméterek a M13. mellékletben találhatók. A paramétereket fizikai jelentésük alapján 6 csoportba lehet sorolni: impedanciák, geometriai méretek, permittivitások, kisugárzási tényező, átmeneti szakasz paraméterei, kitöltési paraméter + ürescella-korrekción. A paraméterek jelentését, tulajdonságait és meghatározásának módját a következőkben tárgyalom.

5.2.3.1 Hullámellenállások

A kábelek és a konnektorok hullámellenállása adott 50Ω , a szabvány szerint. A záróimpedancia értéke is illesztett esetben 50Ω , rövidzár esetén 0Ω , és nyitott esetben végtelen. A gyakorlatban elképzelhető, hogy az illesztett 50Ω nem pontosan " $50+0.0j \Omega$ ", mert a precíz impedancia nagyon drága. Egy adott impedancia értéke a megfelelő műszerrel könnyedén meghatározható.

A cella hullámimpedanciája számolható egész térre vett integrálokkal (56-59) analitikus módon. Számos képletet fejlesztettek szalagvonalak hullámimpedanciájának számolásához a geometriai adatok alapján, amelyek hasonlítanak az általunk vizsgált tesztcellára, és kvalitatívan hasonló eredményeket adnak. Pontos eredményeket az általunk használt tesztcellákra csak numerikus módszerekkel kaphatunk. A cella hullámimpedanciájának számolására a legalkalmasabb programnak az FEMM véges elemes programot találtuk.

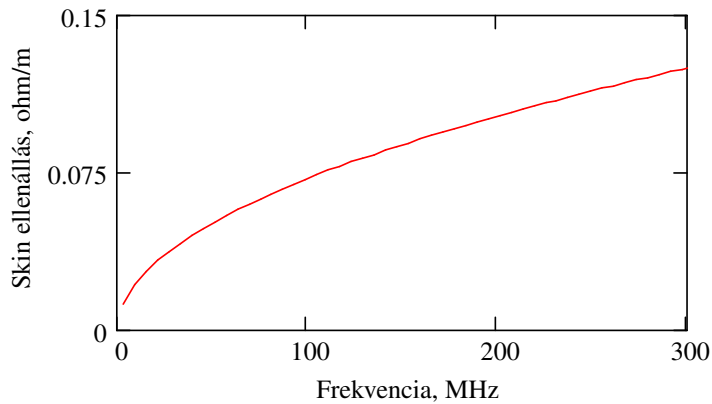
A számoláshoz kell a tesztcella keresztmetszeti rajza, majd a program megadja a kapacitást és az induktivitást, ami alapján a hullámimpedancia számolható:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (87)$$

A tesztcella hullámimpedanciáját a következő módon határoztuk meg. A tesztcella összeszerelése előtt a tervezési fázisban a lemezek magassága, vastagsága és az élek formája ismeretében előre meghatároztuk a körülbelüli lemeztávolságot a véges elemes programmal úgy, hogy a tesztcella hullámimpedanciája 50Ω legyen. Az összerakott cella lemeztávolsága változtatható, a végső távolságot az üres tesztcella reflexiójának minimalizálásával állítottuk be. A cella végső lemeztávolságának ismeretében alkalmaztuk újra a véges elemes programot, és határoztuk meg a hullámimpedanciát a (87) képlettel.

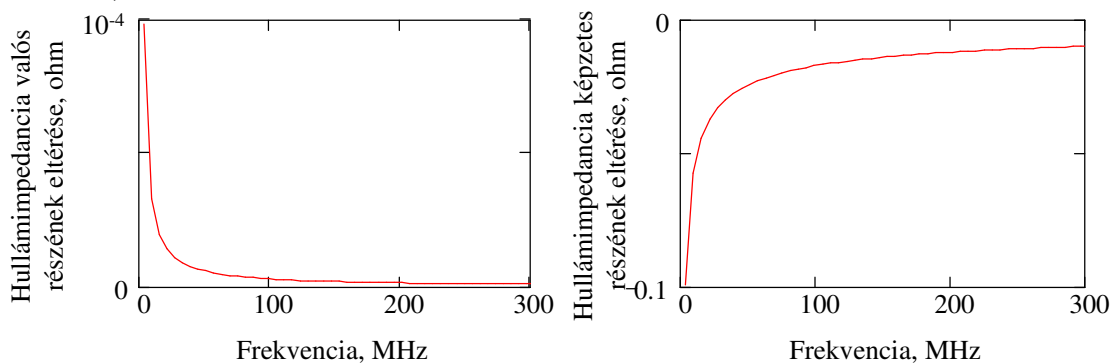
5.2.3.2 Szkinhatás

A szkinhatásnak a nagyfrekvenciás elektromágneses áramok esetén van számottevő hatása. Az elektromágneses hullám a frekvencia növekedtével egyre jobban kiszorul a vezetőből és annak csak nagyon vékony felületi rétegében terjed. A behatolás mélysége függ az anyag vezetőképességétől és a frekvenciától. Alumíniumra a behatolás mélysége a (71) képlettel adódott, amiből a (72) képlettel megkaptuk a felületi ellenállást. A felületi ellenállásból a cella magasságával szorozva kaptuk a vonalmenti ellenállást, ami a frekvencia függvényében a 44. ábrán látható.



44. ábra A szkinellenállás 1 MHz - 300 MHz frekvencia tartományban

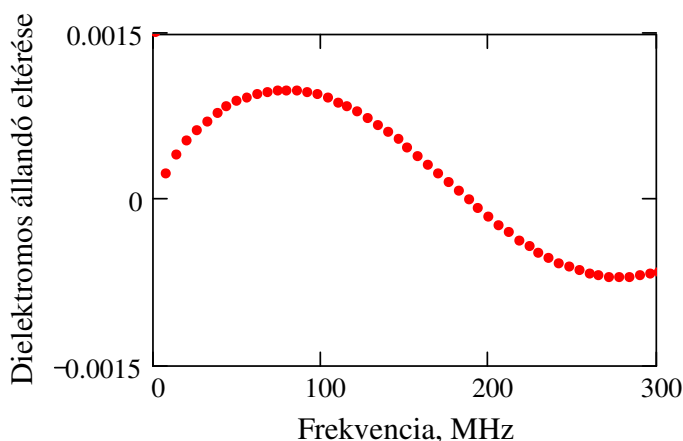
A hullámellenállás megváltozik a szkinhatás miatt úgy, hogy az (55)-ös képletben a R vonalmenti ellenállás értéke nem nulla, hanem a szkinellenállás. A hullámimpedancia megváltozásának mértékét a 45. ábra mutatja:



45. ábra A szkinhatás figyelembevételével számolt hullámimpedancia eltérése a szkinhatás figyelembe vétele nélküli hullámimpedanciától

A 45. ábra alapján látható, hogy a valós rész eltérése elhanyagolható, a képzetes rész is igen kicsi. Ahhoz, hogy megtudjuk mekkora hatása van a dielektromos állandó mérésére, a 46. ábrán egy 14 %-os nedvességtartalmú búzaminta dielektromos állandójának számolására gyakorolt hatását

ábrázoltam. Az ábra a dielektromos állandó különbségét mutatja a szkinhatást figyelembe véve és anélkül:



46. ábra Egy 14 % nedvességtartalmú búzaminta a szkinhatás figyelembevételével számolt dielektromos állandójának eltérése a szkinhatás figyelembe vétele nélküli esettől

A 46. ábrán látható, hogy a vizsgált frekvencia tartományban a hatás elhanyagolható, nem érdemes a modellben figyelembe venni.

5.2.3.3 Geometriai méretek

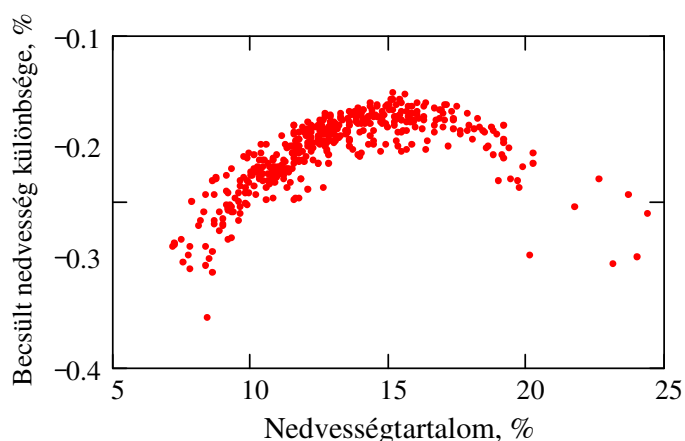
Az ABCD mátrixos modellben a geometriai méretek ténylegesen fizikai méretek. A jelfolyamábrás modellben a gabonartartó rész hossza volt geometriai méret, az első hullámvezető rész illesztési paraméter volt. Ez azért volt, mert nem volt figyelembe véve az átmeneti szakasz fázistolása.

5.2.3.4 Veszteségi tényező

Az α veszteségi tényező a kisugárzott energia figyelembevétele miatt került a modellbe. Értékét rövidzár üzemmódban határoztuk meg, hogy az üres tesztcella reflexiója pontosabban modellezhető legyen. Az illesztett üzemmódban gabonamérésnél a hatása elhanyagolható.

5.2.3.5 Permittivitások

A mester tesztcellában a gabonartartó szakaszt egy 3,18 mm vastag műanyag elválasztó lemez határolja. Dielektromos állandója pontosan nem ismert. A 47. ábra azt mutatja, hogy a modellben a lemez dielektromos állandóját 2,94-ről 3,94-re változtatva mekkora becsült nedvességváltozást okoz búzamintákra:



47. ábra Búzaminták becsült nedvesség eltérése az elválasztó lemez dielektromos állandó értékének 2,94-ről 3,94-re változtatásával

Meglepő módon ennek a vékony lemeznek nagy hatása volt a reflexióra. Ez azt bizonyítja, hogy a modellben számottevő bizonytalanságot okoz a műanyag lemez pontos permittivitásérték ismeretének hiánya, amelyet az illesztési paramétereknek kell korrigálni.

A hullámvezető szakasz dielektromos állandója egyes prototípus celláknál azért különbözhet egytől, mert előfordul, hogy nem üres, hanem az építőiparban is használt szigetelő anyaggal van kitöltve hőszigetelési okból a hőmérséklet vizsgálati mérésekhez.

A gabona permittivitása az ismeretlen paraméter, amit szeretnénk meghatározni.

5.2.3.6 Az átmeneti szakasz helyettesítő-impedanciái

Az átmeneti szakasz helyettesítő-impedanciák értékeinek elméleti meghatározására több sikertelen próbálkozást tettünk. Az átmeneti szakasz két részből áll. Egyrészt a kis átmérőjű konnektor becsatlakozik a nagyméretű cellába. Másrészt a középső lemez és a végfal között van egy kb. 6 mm-es távolság. Ezen a szakaszon a hullámimpedancia nem 50Ω hanem körülbelül 170Ω , amit az ATLC végesdifferenciák módszerével számoltunk. Vannak programok, amelyek jellemzően a kis méretű szalagvonalak átmeneteit helyettesítő impedanciákat számolják, de ezek az ilyen esetben nem alkalmazhatók. Végezetül ezeket a paramétereket, mint illesztő paramétereket használtuk. Értéküket kalibrációs eljárással, optimalizációval határozzuk meg.

5.2.3.7 Kitöltési tényező és ürescella-korrekción

A mérendő dielektromos anyag csak a tér egy bizonyos részét, a lemezek közti részt tölti ki, viszont az elektromágneses hullám a teljes térben terjed, részben az anyagban, másrészt a levegőben. A hullám sebességére gyakorolt hatás természetesen kisebb, mintha az anyag az egész teret kitöltené, de nagyobb, mintha csak levegő lenne. A tényleges dielektromos állandó és a látszólagos dielektromos állandó között a kitöltési tényező teremt kapcsolatot.

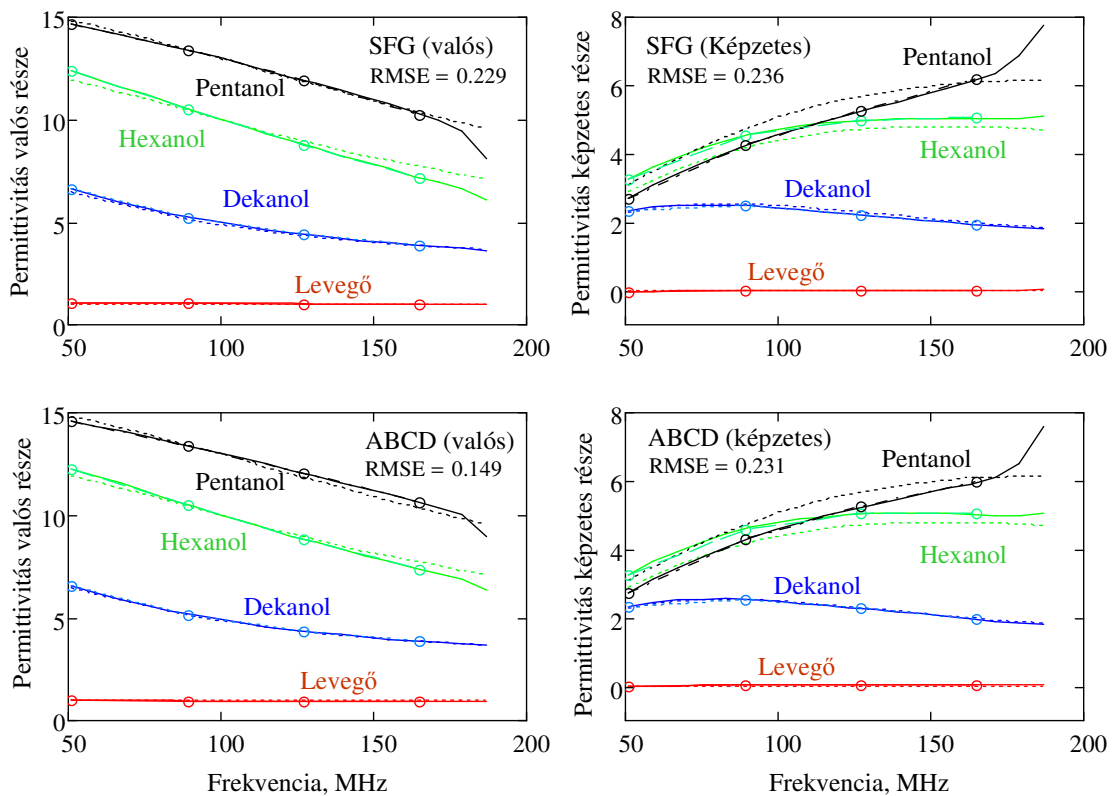
A helyzet azzal bonyolódik, hogy ugyanezen a részen található egy fenéklemez, amely a gabonát tartja a gabonatarító szakaszban. A fenéklemez jelentős vastagsággal és dielektromos állandóval bír a mester tesztcella esetében. Ez a hatás az eredeti eljárásban a sűrűségkorrekcióba volt beépítve, ami nem bizonyult fizikailag indokoltnak.

A kitöltési tényező meghatározása is végeeselemes módszerrel történt. A szimulációt elvégeztük üres tesztcellára és különböző dielektromos állandójú anyagokra. Mivel a (69) egyenlet a kvázi stacionárius esetben jó közelítéssel a látszólagos dielektromos állandót adja, ezért ezzel a képlettel határoztuk meg az effektív dielektromos állandót. A gabona dielektromos állandója és a szimulált látszólagos dielektromos állandó közötti kitöltési korrekció paramétereit (ϵ_m , Corr) görbeillesztéssel határoztuk meg.

A numerikus számítások azt bizonyították, hogy az ürescella-korrekció (Corr) értéke nem változik jelentősen a cellában lévő gabona dielektromos állandójától, ezért a kitöltési korrekcióban mint additív tényező szerepel (80). Az ürescella-korrekcióra végeeselemes módszerrel kapunk egy értéket, de mint illesztési paramétert használjuk.

5.2.4 A tesztcella kalibrációja és a modellek eredményeinek az összehasonlítása

Az ABCD modell hatékonyságát alkohol kalibrációs méréssel vizsgáltuk. A mérési eredményekre ABCD modellt és a jelfolyamábrás modellt optimalizáltuk. Az ABCD modell esetében az illesztési paraméterek az átmeneti szakasz (Z_{T1} , Z_{T2} , Y_T) és az ürescella-korrekció (Corr) paraméter volt, míg az eredetileg használt jelfolyamábrás modell esetén az első hullámvezető szakasz hossza (d_1) és a kitöltési korrekció paramétere (ϵ_m , Corr) voltak. A paraméterek értékei a M13. mellékletben található. A paraméterek értékei nem hordoznak tudományos információt. Az eredményt a 48. ábra mutatja.



48. ábra Az alkohol kalibráció eredménye a jelfolyamábrás (SFG) és ABCD módszerekkel; pontvonal: elméleti érték, folytonos vonal: mért érték, kör: a kalibráció során használt pontok

Az eredményekből látható, hogy az ABCD mátrixos megközelítéssel nem kaptunk gyakorlati szempontból lényegesen jobb illeszkedést, mint ahogy azt vártuk. A valamivel jobb illeszkedés azzal is magyarázható, hogy míg a jelfolyamábrás esetén 3 illesztési paramétert használtunk, addig az ABCD modell esetében 4-et.

A javulás hiányának több oka is lehet. Az első ok, hogy a mért alkoholok permittivitása nem feltétlen az elméleti értéknek megfelelő. A másik, hogy az általunk alkalmazott ABCD modell további fejlesztésre szorul.

5.3 TESZTCELLA-SZTENDERDIZÁCIÓ

Az általunk használt terminológiával a kalibráció során egy ismert dielektromos állandójú anyagot tekintünk referenciának, viszont a sztenderdizáció során egy adott cella - mester tesztcella - által mért dielektromos állandót tekintjük referenciának. Az eljárásokban közös, hogy mindkét esetben a modell paramétereit optimalizáljuk, hogy a referenciának tekintett permittivitással való egyezés a lehető legjobb legyen.

A kalibráció átvitelének alapfeltétele, hogy az a tesztcella, amire a kalibrációt szeretnénk átvinni, megfelelően legyen sztenderdizálva a mester tesztcellához. Ez azt jelenti, hogy a két cella azonos gabonamintára a megfelelő hibahatáron belüli sűrűségkorrigált dielektromos állandót adja.

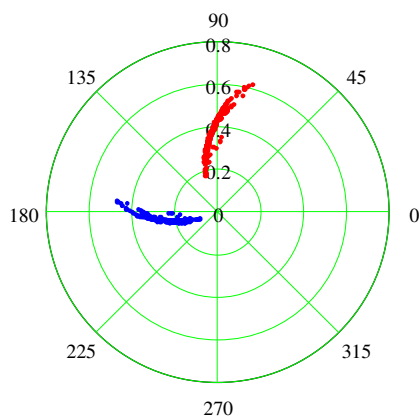
Ahogy már az "Anyagok és módszerek" részben tárgyaltam, három sztenderdizációs eljárás hatékonyságát hasonlítottuk össze az ABCD mátrixos modell alkalmazásával, abból a célból, hogy megállapíthassuk, hogy a kis veszteségi tényezőjű szerves szilárd anyagok alkalmasak-e sztenderdizációs anyagnak. Az illesztési paraméterek az átmeneti szakasz (Z_{T1} , Z_{T2} , Y_T) és az ürescella-korrektúra (Corr) voltak. Az összehasonlításoknak két szempontja volt. Az egyik, ami gyakorlati szempontból fontos, hogy mennyire jó a két tesztcella által mért sűrűségkorrigált dielektromos állandóból származtatott nedvesség egyezése. Ennek jellemzésére ábrázoltam a nedvességeltéréseket a nedvességtartalom függvényében és megadtam a hibák átlagát (továbbiakban: bias), és a hibák RMSE értékét (75). A másik szempont, ami tudományosan érdekes, hogy mennyire jó az egyezés az 50-250 MHz-es frekvenciatartományban a gabonák komplex permittivitásának. Ennek jellemzésére egyrészt kiválasztottunk három 8%, 13% és 20% nedvességtartalmú szójamintát, melyek permittivitásának valós és képzetes részét egyedileg ábrázoltunk a frekvencia függvényében, másrészt az összes minta RMSE értékét a valós és képzetes részre ábrázoltuk a nedvességtartalom függvényében, hogy képet alkothassunk arról, hogy az egyezés jóságának van-e nedvességtartalom függése és megadtuk a RMSE értékek átlagát az összes mintára.

5.3.1 Gabona, mint sztenderdizációs anyag

A gabona, mint sztenderdizációs anyag, nagy gyakorlati hátránya, hogy a gabonaminta nedvességtartalma a mérések során változhat. A következőkben bemutatom, hogy milyen sztenderdizációs eredmények érhetők el gabonaminták használatával.

5.3.1.1 Adott frekvencián több mintával végzett sztenderdizáció

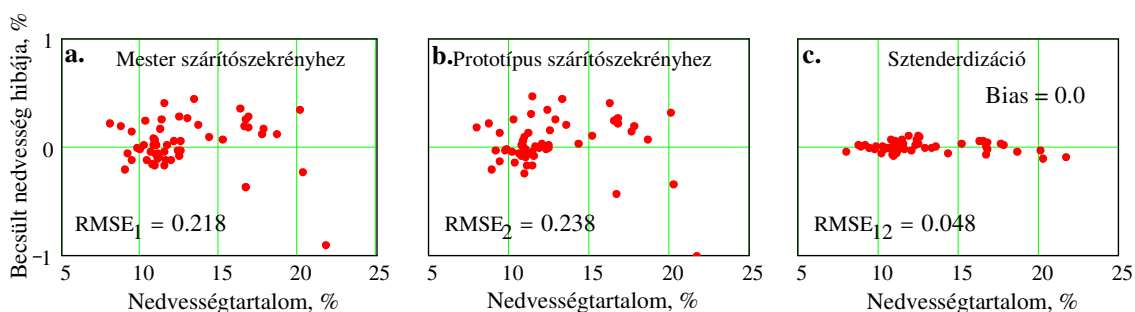
A 49. ábra az összes minta komplex reflexiók tényezőinek nagyságát ábrázolja a fázisszög függvényében polárkoordináta-rendszerben. Piros a mester, kék a prototípus tesztcella.



49. ábra Az összes minta komplex reflexiós tényezői polárkoordináta-rendszerben,
piros: mester tesztcella, kék: prototípus tesztcella

A 49. ábrán látható, hogy a két tesztcellán különböző nagyságú és fázisú reflexiós tényezők adódnak azonos mintákra. A cél, hogy a prototípus tesztcella modelljéhez olyan illesztési paramétereket találjunk, hogy a lehető legkisebb legyen a nedvességmérési eredmény eltérése a mester tesztcellával kapott nedvességmérési eredménytől. Ennek érdekében az első módszerrel kizárólag 149 MHz-en csak a sűrűségkorrigált dielektromos állandó értékének az egyezése volt a cél. A sztenderdizációhoz a szóját választottuk, ami 55 mintából állt.

A sztenderdizáció eredményét a sztenderdizációhoz használt szójamintákon a 50. ábra mutatja. Ezt az elrendezést használom a következő ilyen típusú ábrákon: a.: a mester tesztcella referencia nedvességtől való eltérése (nevezhetjük az adott módszer hibájának is); b.: a sztenderdizált cella referencia nedvességtől való eltérését mutatja; c.: a két cella által mért nedvesség eltérését mutatja. A sztenderdizáció szempontjából mindig a c. ábra a fontos.

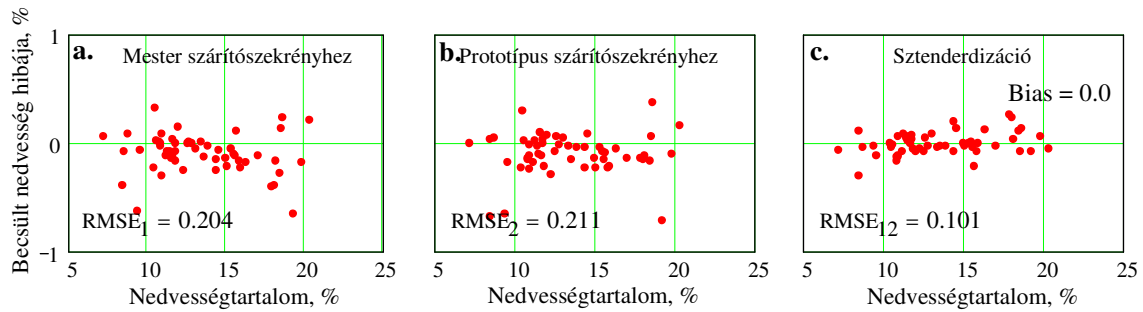


50. ábra A szójaminták nedvességeltérései, a: mester tesztcellával meghatározott nedvesség eltérése a szárítószelethez képest, b: prototípus tesztcellával meghatározott nedvesség eltérése a szárítószelethez képest, c: a két tesztcellával meghatározott nedvességek különbsége

Az 50. ábrán látható, hogy a két cella nedvességmérési eltérése (c.) jóval kisebb, mint a referencia nedvességhez viszonyított eltérések (a. és b.), annak ellenére, hogy a két cella mérete között nagy eltérés van. Ez fontos eredmény, ami azt mutatja, hogy két lényegesen különböző tesztcella

egymáshoz képest jobb egyezést mutat, mint a referencia módszerhez. Ezt eddig korábban nem sikerült elérni a különböző típusú berendezések között, ahogy azt az irodalmi összefoglalóban bemutattam. Ez is mutatja, hogy miért használunk különítjük el fogalmilag a sztenderdizációt és a kalibrációt.

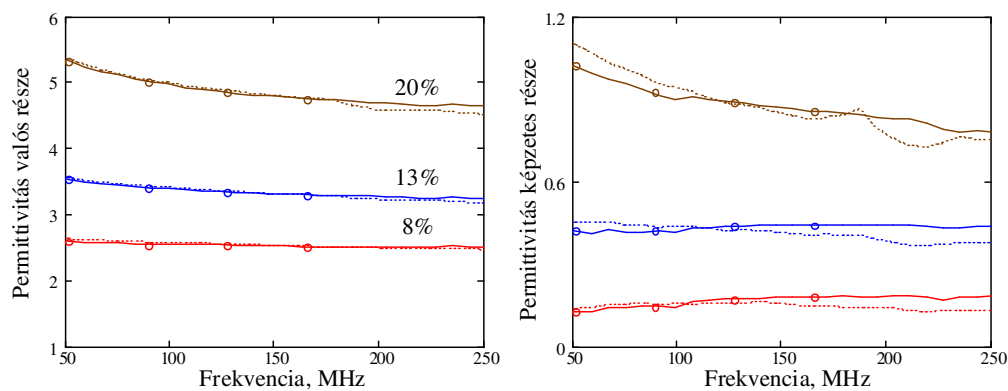
Az 50. ábrán látható eredmény más gabonafajjal való összehasonlítás céljából a sztenderdizációt elvégeztük búzamintákra is. Az eredmény az 51. ábrán látható.



51. ábra A búzaminták nedvességeltérései, a: mester tesztcellával meghatározott nedvesség eltérése a szárítószekrényes méréshez képest, b:prototípus tesztcellával meghatározott nedvesség eltérése a szárítószekrényes méréshez képest, c: a két tesztcellával meghatározott nedvességek különbsége

Látható, hogy a két cella egyezése búza esetén is jobb, mint a referencia módszertől való eltérés. Viszont annak ellenére, hogy a referencia módszertől való eltérés kisebb búza esetén, a sztenderdizáció eredménye rosszabb, mint az a 50.c ábrán látható. Ennek okát a további fejezetekben tárom fel. Ezek az eredmények miatt választottuk a szóját, mint sztenderdizációs anyag.

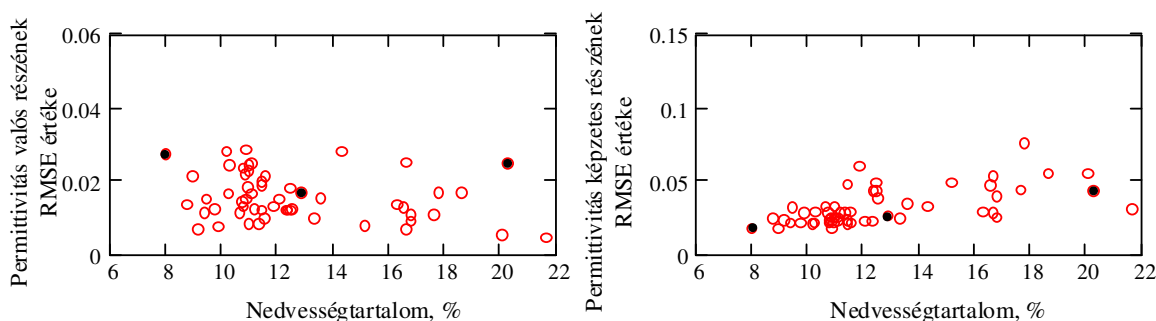
A következő ábrán a frekvencia szerinti egyezés látható három validációs mintának kiválasztott szójamintán.



52. ábra Három validációs szójaminta permittivitása;
szaggatott vonal: mester tesztcella, folytonos vonal: prototípus tesztcella

Az 52. ábrán látható, hogy a dielektromos állandó nagyon jól illeszkedik a mester tesztcella által becsült dielektromos állandóra, annak ellenére, hogy a sztenderdizáció kizárólag 149 MHz-en történt. A veszteségi tényező viszont meredekségében különbözik.

Annak érdekében, hogy minden mintára legyen statisztikai mérőszám és ennek nedvességtartalomtól való függését megállapíthassuk, az 53. ábra az összes szójára mutatja a RMSE értékeket a dielektromos állandóra és a veszteségi tényezőre a nedvességtartalom függvényében. A fekete pontok az 52. ábrán látható minták értékei.

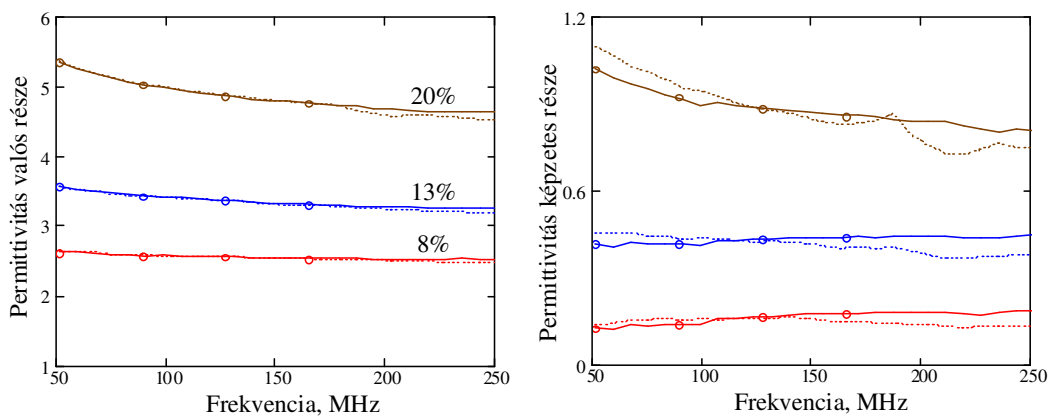


53. ábra Az illeszkedésre jellemző RMSE értékek a nedvességtartalom függvényében; fekete pontok az 52. ábra által mutatott minták

A permittivitás valós részének RMSE értékeinek átlaga 0,0158-nak, a képzetes részé 0,0323-nak adódott. Az 53. ábrán látható, hogy a dielektromos állandó illeszkedésének jósága a nedvességtartalomtól független. A képzetes rész illeszkedése a nedvességtartalom növekedtével romlani látszik.

5.3.1.2 Több frekvencián kevés mintával végzett sztenderdizáció

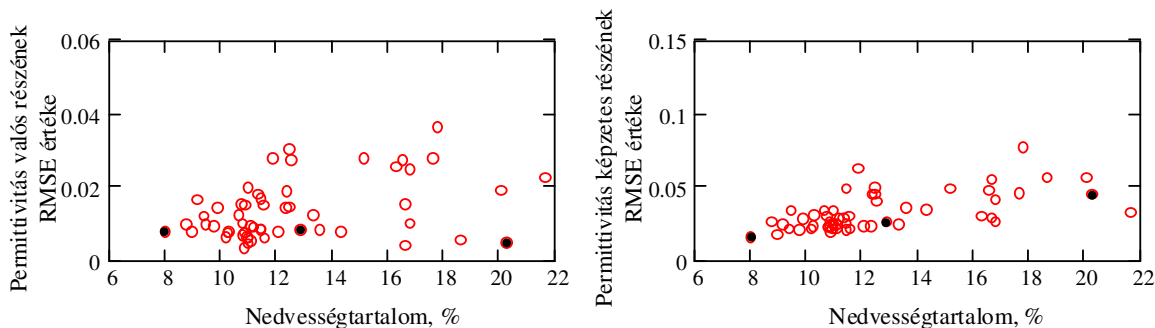
A gyakorlati életben az idő és pénzhatékonyság miatt nem lehet nagyszámú mintát használni a sztenderdizációhoz, hanem meg kell határozni, hogy hány minta szükséges a sikeres sztenderdizáció elvégzéséhez. Mivel a célunk, hogy a sztenderdizációhoz a szilárd szerves anyagokat használjuk, és ebből csak három féle anyag állt rendelkezésünkre, ezért az összehasonlíthatóság kedvéért csak három gabonamintát használtunk a sztenderdizációhoz. A minták az előző részben már kiemelt szójaminták voltak. A sztenderdizáció eredménye az adott mintákra a következő ábrán látható.



54. ábra Három gabonaminta permittivitása, szaggatott vonal: mester tesztcella, folytonos vonal: prototípus tesztcella

Az eredmény nagyon hasonlít az előző esetben (52. ábra) kapotthoz. A képzetes rész annak ellenére, hogy a sztenderdizáció ezeken a mintákon történt, ugyanúgy meredekségbeli eltérést mutat, aminek az oka még nem ismert.

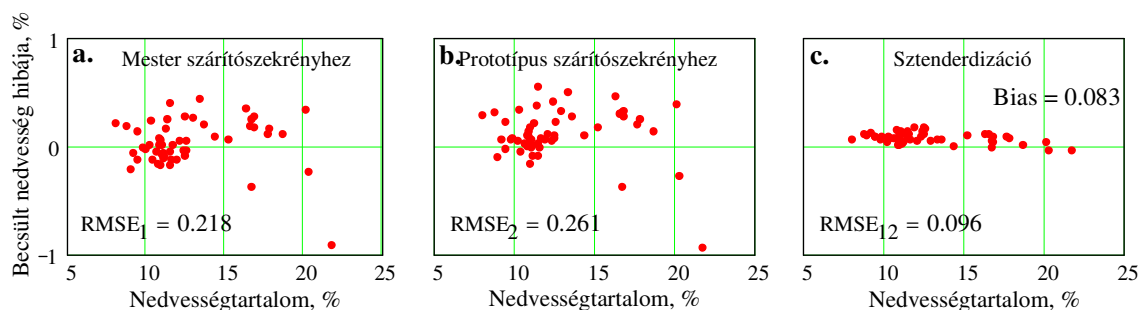
Az összes gabonára az RMSE értékét az 55. ábra mutatja, feketével jelölve az 54. ábrán látható mintákat.



55. ábra Az illeszkedésre jellemző RMSE értékek a nedvességtartalom függvényében, a fekete pontok az 54. ábra által mutatott minták

A permittivitas valós részének RMSE értékeinek átlaga 0,0136-nak, a képzetes részé 0,0332-nek adódott. A dielektromos állandókat tekintve (a.) a fekete pontokon látható, hogy ebben az esetben a három gabona illeszkedése jobb, mint az előző esetben, ami várható volt, mivel ezekkel a mintákkal történt a sztenderdizáció. Viszont a többi minta meglepő módon nem mutatott jobb illeszkedést és a nedvességtartalom növekedtével valamelyest romló eredményt mutat, annak ellenére, hogy a sztenderdizációs módszer jellegéből adódóan ennek általános javulását várnánk. A képzetes rész eredménye hasonló eredményt adott az előző esethez.

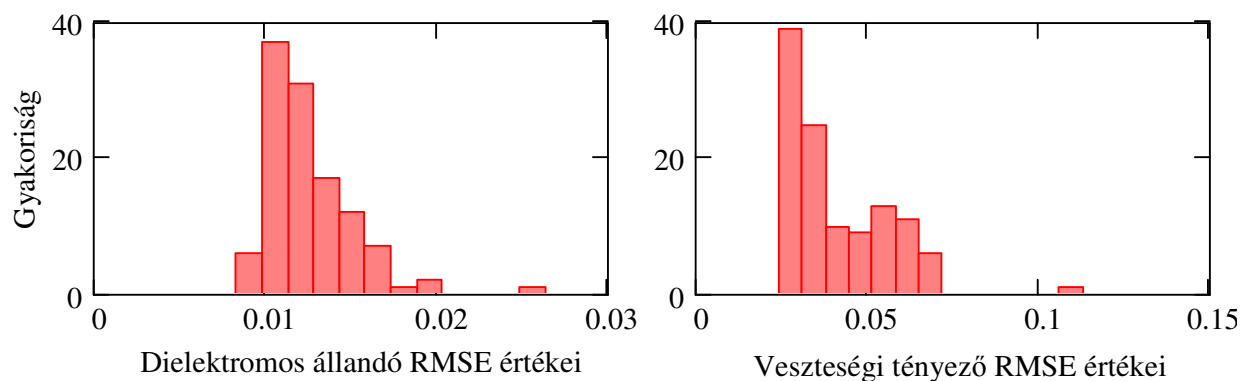
Az 56. ábra a nedvességmérés eredményét mutatja a szójamintákra.



56. ábra A szójaminták nedvességeltérései, a: mester tesztcellával meghatározott nedvesség eltérése a szárítószelethez méréshez képest, b: prototípus tesztcellával meghatározott nedvesség eltérése a szárítószelethez méréshez képest, c: a két tesztcellával meghatározott nedvességek különbsége

Látható, hogy a két cella nedvességmérési eredményei kis mértékben pozitívan eltérnek. Az átlagos eltérés 0,083%.

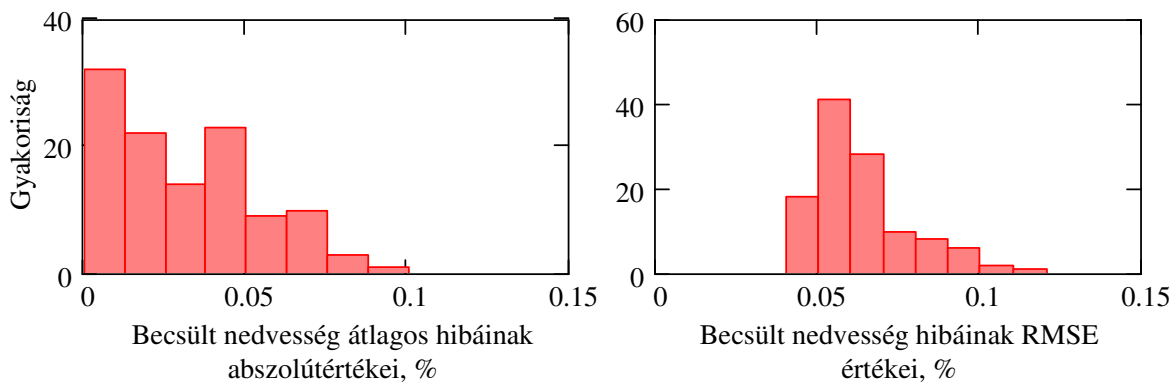
Felvetődik a kérdés, hogy ha másik szójamintákat választunk a sztenderdizációhoz, akkor hogyan alakulnak az eredmények. Ezért három mintát véletlenszerűen kiválasztva végeztük el a sztenderdizációt 114 esetben. A következő ábra az RMSE értékek histogramját mutatja.



57. ábra A RMSE hibák átlagai a különböző sztenderdizációs szettekhez

Az ábrán látható, hogy az előbbieken kapott 0,136 valós részre, 0,0332 képzetes részre egy "átlagos" eredmény, de ettől eltérő eredmények is kaphatók. A permittivitás valós részének RMSE értékeinek átlaga 0,0132-nak, a képzetes részé pedig 0,0447-nek adódott.

A 114 sztenderdizáció nedvességmérési értékekre vonatkozó eredményei az 58. ábrán láthatók ugyancsak histogramokon összefoglalva. A nedvességeltérés hibáinak abszolútértékeit tekintjük, mert mindegy, hogy pozitív vagy negatív az átlagos hiba (bias). Másrészt egy ilyen szimuláció esetén a hibák abszolútértékeinek az átlaga jellemző, hiszen az előjeles hibák átlaga nullát adna.



58. ábra Az átlagos eltérések és RMSE értékek a 114 különböző sztenderdizációs szettekhez

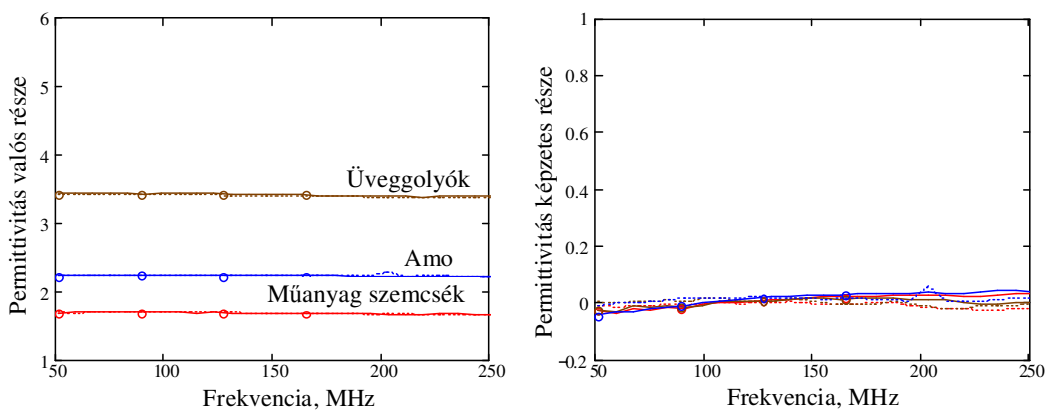
Ezek az ábrák is látható, hogy mennyire befolyásolja az eredményt a mintaszett megválasztása. Az figyelemre méltó, hogy legrosszabb esetben is csak 0,1 % -os az átlagos eltérés. Az átlagos eltérések abszolútértékének átlaga 0,031 %-nak, az RMSE értékek átlaga pedig 0,064 %-nak adódott.

Ezek az eredmények nyilvánvalóvá teszik, hogy a sztenderdizációhoz használt gabonaminták számát és minőségét körültekintően kell megválasztani.

5.3.2 Szervetlen szilárd anyagok

Az igazán érdekes kérdés, hogy az anyagok és módszerek részben ismertetett szervetlen szilárd anyagok, amelyeknek a veszteségi tényezői nulla közeli értékek, milyen eredményeket adnak.

A következő ábra a sztenderdizáció eredményét mutatja a frekvencia függvényében ezekre a szervetlen szilárd anyagokra. A dielektromos állandók értékei sűrűségkorrekció nélküliek.

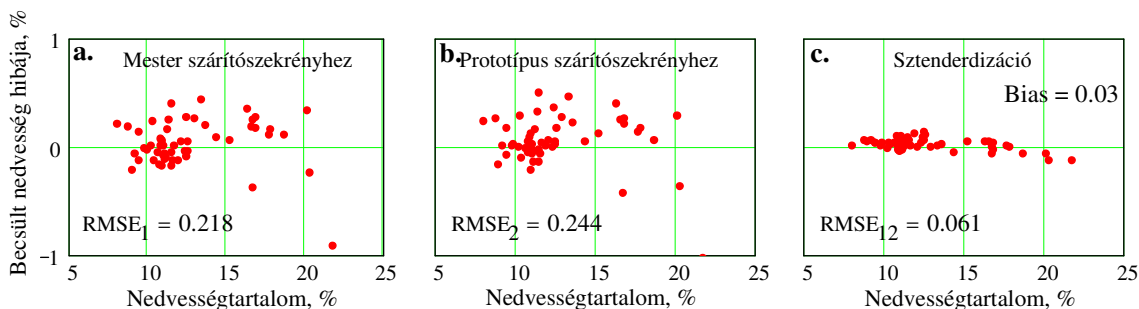


59. ábra Három szervetlen sztenderdizációs anyag permittivitása, szaggatott vonal: mester testcella, folytonos vonal: prototípus testcella

Látható, hogy az anyagok dielektromos állandójának értéke a száraz gabonák értékének tartományába esik, míg a veszteségi tényező nulla körül van. A dielektromos állandónál nagyon jó

egyezés figyelhető meg, de a képzetes rész hibája nehezen értelmezhető, mert a mester tesztcellával mért értékek az alacsony frekvencián kis mértékben negatív értékeket is felvesznek, ami fizikailag lehetetlen, de mint mérési hiba értelmezhető. A következőkben megfigyelhetjük, hogy az ilyen módon sztenderdizált cella milyen eredményeket ad a gabonamintákra.

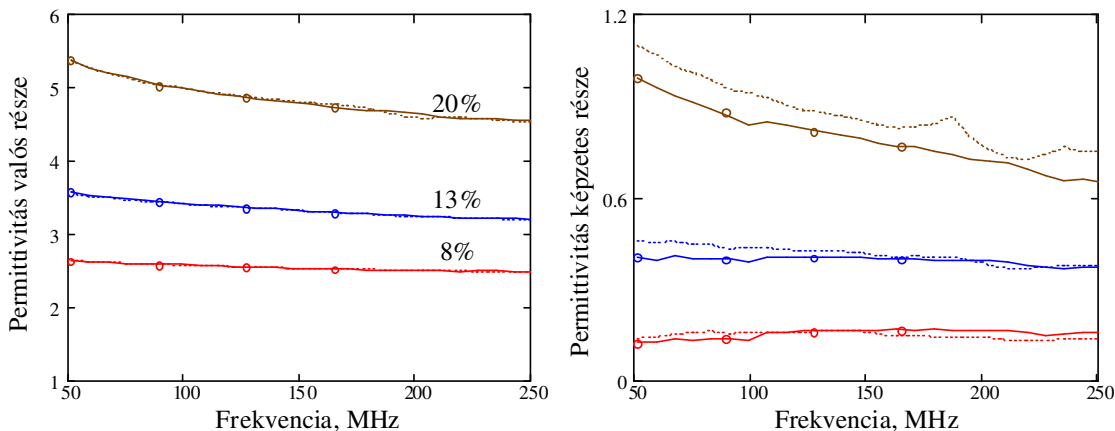
A 60. ábra a szójaminták nedvességmérési eredményeinek eltérését mutatja:



60. ábra A szójaminták nedvességeltérései, a: mester tesztcellával meghatározott nedvesség eltérése a szárítószekrényes méréshez képest, b:prototípus tesztcellával meghatározott nedvesség eltérése a szárítószekrényes méréshez képest, c: a két tesztcellával meghatározott nedvességek különbsége

Az átlagos eltérés a két cella között 0,03-nak adódott, ami nagyon jó egyezés. Az eltérések sajnálatos módon negatív tendenciát mutatnak, ami valószínűleg a sztenderdizációs anyagok kis veszteségi tényezője miatt van.

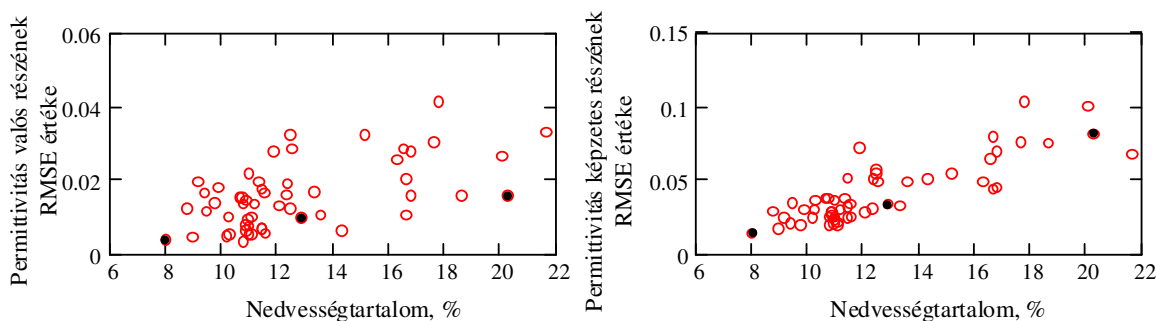
A 61. ábra a korábban kiválasztott gabonaminták illeszkedését mutatja a frekvencia függvényében.



61. ábra Három gabona permittivitása, szaggatott vonal: mester tesztcella, folytonos vonal: prototípus tesztcella

A dielektromos állandó nagyon jól illeszkedik, viszont a veszteségi tényező illeszkedése a legnedvesebb mintára jelentősen rosszabbnak adódott, mint a gabonákkal történt sztenderdizációk esetében láthattuk. Viszont a meredekségbeli eltérés kisebbnek mutatkozik.

Az összes szójamintára az RMSE értékek a nedvességtartalom függvényében a 62. ábrán láthatók.



62. ábra A illeszkedésre jellemző RMSE értékek a nedvességtartalom függvényében, a fekete pontok az 54. ábra által mutatott minták

A permittivitás valós részének RMSE értékeinek átlaga 0,0158-nak, a képzetes részé 0,042-nek adódott. Látható, hogy a dielektromos állandó hasonló eredményt adott, mint azt a gabonák esetében tapasztaltunk, viszont a veszteségi tényező illeszkedése romlott a nedvességtartalom növekedtével. A determinációs együttható értéke 0,70-nak adódott a nedvességtartalom és az RMSE értékek között.

5.3.2.1 Az eredményekből levonható következtetések

Mindhárom módszerre a statisztikai eredményeket összesítve a 7. táblázat tartalmazza:

7. táblázat A sztenderdizációs eljárások eredményeinek összefoglalása

	Gabona (55db) Egy frek.	Gabona (3 db) Több frek.		Szervetlen anyagok Több frek.
		114 db sztenderdizáció átlaga		
RMSE (Valós rész összes mintára)	0,0158	0,0136	0,0132	0,0158
RMSE (Képzetes rész összes mintára)	0,0323	0,0332	0,0447	0,042
BIAS (Nedvességtartalom), %	0	0,083	0,031	0,03
RMSE (Nedvességtartalom), %	0,048	0,096	0,064	0,061

A táblázat utolsó oszlopát összehasonlítva az előtte lévő oszlopokkal megállapítható volt, hogy a dielektromos állandó (valós rész) egyezése a frekvencia függvényében rosszabb RMSE értéket adott, mint a 3 minta és a több frekvenciát alkalmazó sztenderdizációs módszer esetén kaptunk, viszont azonos értéket ad az 55 mintát alkalmazó sztenderdizációval. A veszteségi tényező (képzetes rész) RMSE értéke rosszabbnak adódott, de látható, hogy rosszul megválasztott gabonaminták esetéhez képest jobb eredményt tud szolgáltatni. Gyakorlati szempontból a

nedvességtartalom becslésének eredményei fontosak. Ezek azt mutatják, hogy az átlagos eltérés (bias) és az RMSE kisebb mint általában 3 gabona minta esetén kapható.

Végezetül ezek alapján megállapítható, hogy a közel nulla veszteségi tényezőjű anyagok alkalmasak lehetnek a gyakorlati szempontokat kielégítő sztenderdizációs eljáráshoz, mert a NIST által megadott követelmények - (ld. 2.6.2 fejezet), hogy az átlagos eltérésnek 0.05 %-on belülnek kell lennie a mester berendezések között, és 0,15 %-on belülnek a kereskedelmi és a mester berendezés között egy szűk nedvességtartományon belül, - ezzel az eljárással elérhető.

5.4 A BETÖLTÉS HATÁSA A GABONANEDVESSÉG-MÉRÉSRE

Egy nedvességmérő berendezésnél a pontosságon túl nagyon fontos, hogy egy adott minta ismételt mérése során az eltérés minimális legyen. A ismételt mérés variációját alapvetően a betöltés során létrejövő gabonahalmaz halmazsűrűségének különbsége okozza. Annak ellenére, hogy a korábbi kutatások bizonyították az LLL sűrűségkorrekció hatékonyságát, feltételeztük, hogy az egyes betöltési módok gyakorlati szempontból szignifikánsan különböző variációt mutathatnak, ezért a betöltések hatásvizsgálatának fő célja a nedvesség szórásának megállapítása volt.

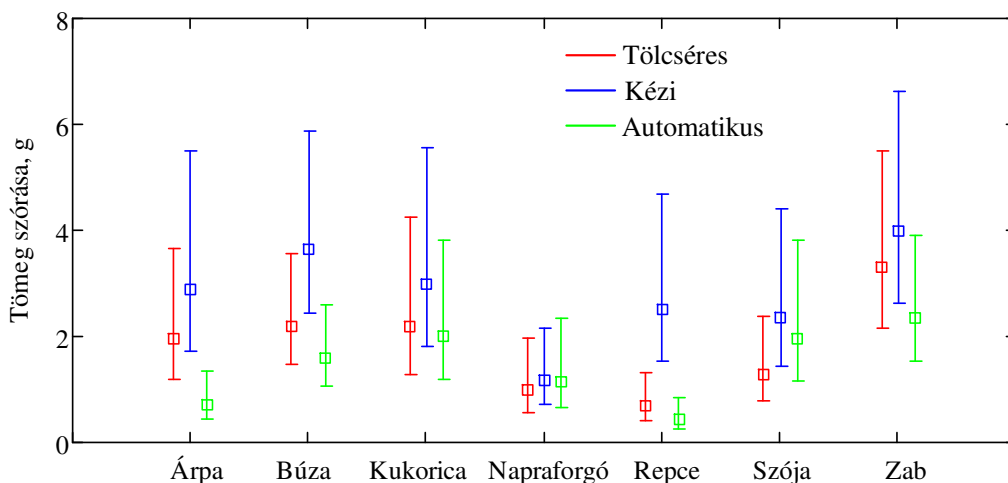
Az USA-ban a nedvességmérő berendezések nemcsak a nedvességtartalmat adják meg, hanem az adott minta térfogattömegét is, amit ismert tesztcellatérfogat esetén a cellában lévő gabona tömegéből lehet meghatározni. Ezért fontos volt a tömeg szórásának megállapítása is.

5.4.1 Szórás eredmények

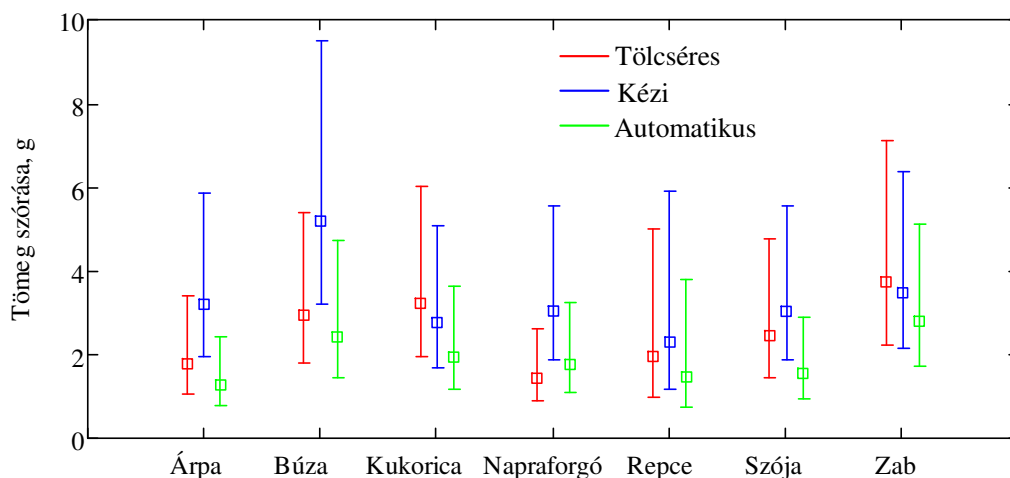
A szórás vizsgálata három betöltésre 7 gabonafajjal, száraz és nedves mintákon, 20-szoros ismétléssel történt. Az összes eredmény a M6. mellékletben látható, a kiugró, ezért az elemzésekhez nem használt mérések feltüntetésével.

5.4.1.1 A tömeg szórása

A tömegek szórásai a 95%-os megbízhatósági tartományok feltüntetésével a következő ábrákon láthatók száraz mintákra (63. ábra) és nedvesített mintákra (64. ábra):



63. ábra A tömeg szórása száraz mintákra a három betöltés esetén;
négyzetek: szórásértékek, vonalak: szórásértékek 95%-os megbízhatósági tartományai



64. ábra A tömeg szórása nedves mintákra a három betöltés esetén;
négyzetek: szórásértékek, vonalak: szórásértékek 95%-os megbízhatósági tartományai

Már a 63. ábrán, és a 64. ábrán is látható, hogy az automatikus betöltés szórásai több esetben a legkisebbek, és a kézi betöltésé a legnagyobbak.

A statisztikai összehasonlításhoz F próbát alkalmaztunk. Feltételeztük, hogy a tömegmérések eredményei normális eloszlást követnek; az átlagtól való eltérések csak véletlen hibákból adódnak. A kérdést úgy tettük fel, hogy jobb-e az automatikus betöltés a tölcséres, illetve a kézi betöltéshez viszonyítva. Az eredmények a 8. táblázatban láthatók:

8. táblázat A tömegek szórásainak összehasonlítása *

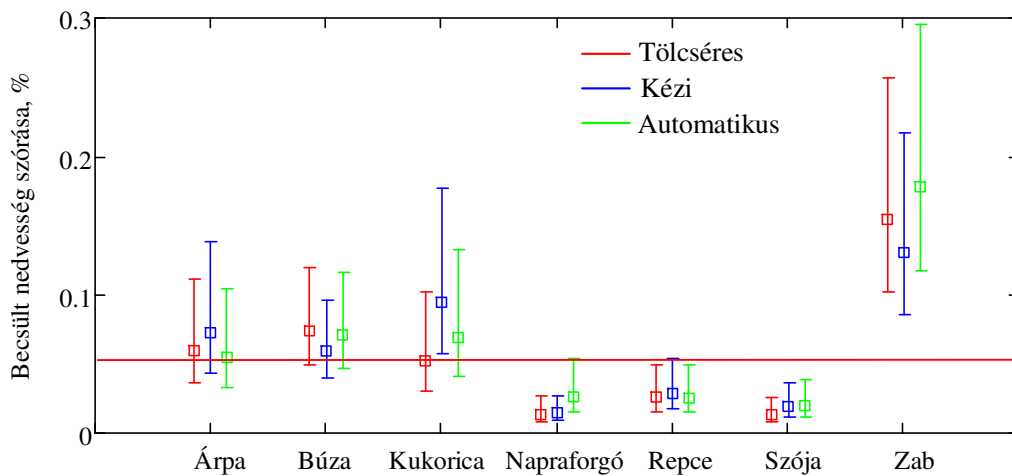
	Automatikus a tölcséreshez viszonyítva		Automatikus a kézihez viszonyítva	
	Száraz	Nedves	Száraz	Nedves
Árpa	jobb+	0	jobb+	jobb+
Búza	jobb	0	jobb+	jobb+
Kukorica	0	jobb	0	0
Napraforgó	0	0	0	jobb
Repce	jobb	0	jobb+	jobb
Szója	rosszabb	jobb	0	jobb+
Zab	jobb	0	jobb+	0

* (jobb+ és rosszabb+: 99% szignifikancia szinten jobb ill. rosszabb; jobb és rosszabb: 95% szignifikancia szinten jobb ill. rosszabb; "0": nincs szignifikáns különbség)

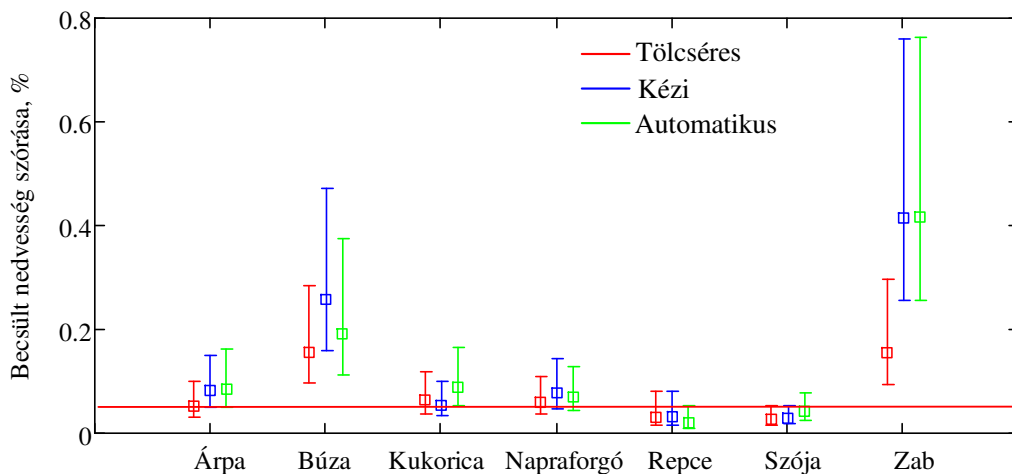
Az eredményekből látszik, hogy az automatikus betöltés a kézi betöltéshez viszonyítva még azonos felhasználó esetén is, majdnem minden esetben jobbnak bizonyult. Ez az eredmény nem okozott meglepetést, csak megerősítette, amit vártunk. A tölcséressel összevetve az automatikus betöltés 6 esetben bizonyult jobbnak.

5.4.1.2 A nedvesség szórása

A nedvességek szórására vonatkozó eredmények a 65. és 66. ábrán láthatók:



65. ábra A becsült nedvességek szórásai a három betöltésre száraz minták esetén; négyzet: a szórásérték, a vonalak: a szórásérték 95%-os megbízhatósági tartományai



66. ábra A becsült nedvességek szórásai a három betöltésre nedves minták esetén; négyzet: a szórásérték, a vonalak: a szórásérték 95%-os megbízhatósági tartományai

Az eredmények értékelésének egy lehetséges szempontja, hogy a felhasználó számára a nedvességmérő berendezés akkor tűnik különösen jónak, ha az ismételt betöltések során a nedvesség eltérése 0,1% vagy kisebb. Ahhoz, hogy egy mérés 95%-os valószínűséggel $\pm 0,1$ %-os eltérést mutasson - a hibák normál eloszlását feltételezve - 0,051 %-os lehet a szórás. Az ennek megfelelő vonal látható a 65. és 66. ábrán. Ennek a legegyszerűbb szempontnak a száraz minták esetén a napraforgó, a repce és a szója felelt meg.

A betöltések statisztikai összehasonlításához ebben az esetben is F próbát alkalmaztunk. Az eredményeket a 9. táblázat tartalmazza:

9. táblázat A becsült nedvességek szórásainak összehasonlítása

	Automatikus a tölcéseshez viszonyítva		Automatikus a kézihez viszonyítva	
	Száraz	Nedves	Száraz	Nedves
Árpa	0	rosszabb	0	0
Búza	0	0	0	0
Kukorica	0	0	0	rosszabb
Napraforgó	rosszab+	0	rosszabb	0
Repce	0	0	0	jobb
Szója	0	rosszabb	0	0
Zab	0	rosszab+	0	0

* (jobb+ és rosszabb+: 99% szignifikancia szinten jobb ill. rosszabb; jobb és rosszabb: 95% szignifikancia szinten jobb ill. rosszabb; "0": nincs szignifikáns különbség)

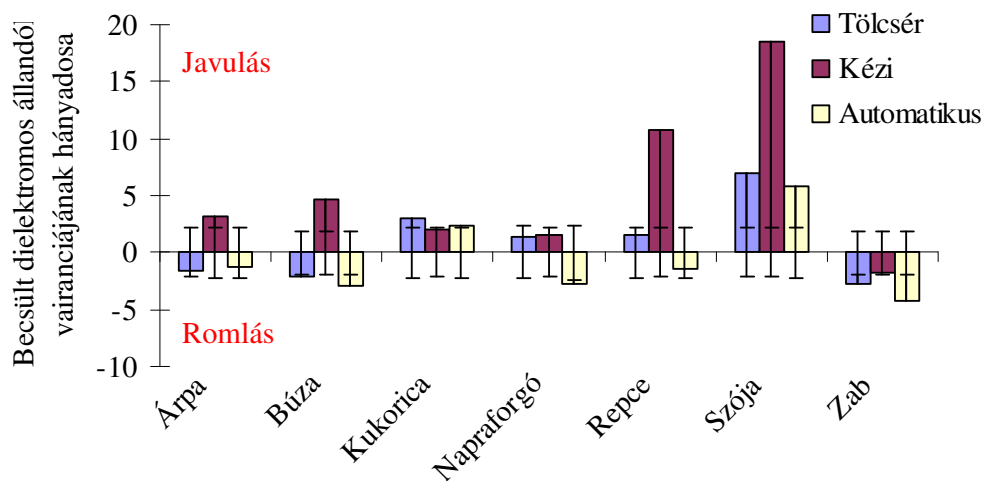
A 9. táblázat alapján látható, hogy a tömeg szórásaival ellentétben a nedvességek szórásai már rosszabbak a tölcéseshez képest. A 65. ábra és a 66. ábra alapján azonban az is látható, hogy gyakorlati szempontból lényeges különbséget csak a nedves zab mutat. A táblázat alapján az automatikus és a kézi betöltés szórása azonosnak mondható, ami azt jelenti, hogy egy gyakorlott felhasználó által produkált szórás alacsony. Azt nem vizsgáltuk, hogy a kézi betöltés módjának változása hogyan befolyásolja a nedvességmérési eredmények szórását.

5.4.1.3 Az LLL korrekció hatása

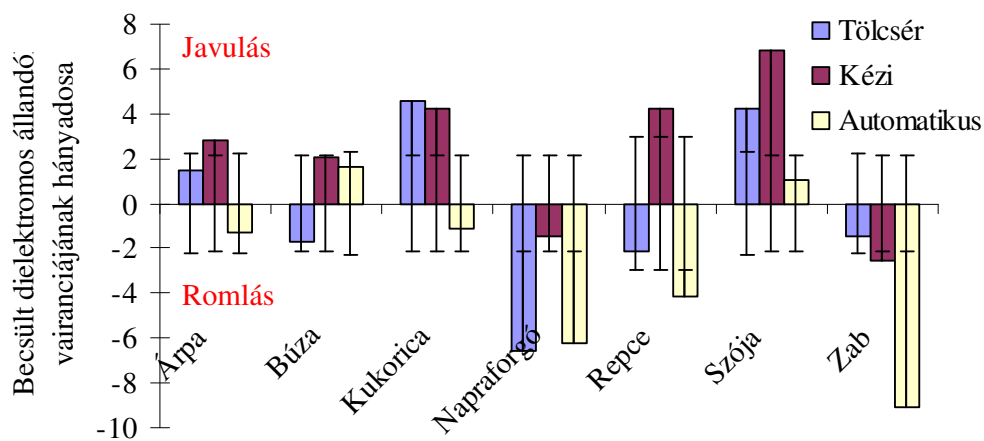
A tömegmérési és a nedvességmérési eredmények szórását összevetve látható, hogy míg a tömegeredmények szórásai az automatikus betöltésre többnyire jobbak voltak, addig a nedvességmérési eredmények esetén inkább rosszabbaknak adódtak. Feltételeztük, hogy az LLL sűrűségkorrekció játszik ebben fontos szerepet.

Ennek igazolására a sűrűségkorrigált és korrigálatlan dielektromos állandók szórását hasonítottuk össze. Azért nem a becsült nedvességeket, mert a nedvesség a sűrűségkorrigálatlan dielektromos állandóból a változtatás nélküli VHF-UGMA algoritmussal teljesen hamis eredményt ad. Az összehasonlítást az F próba alapján végeztük.

Az eredményeket nem táblázatban, hanem ábrán mutatjuk be, mert szemléletesebb. A következő ábrákon (67. és 68. ábra) a sűrűségkorrigálatlan és sűrűségkorrigált dielektromos állandók variációinak hányadosait láthatjuk. Azért, hogy jól elváljon, hogy mely esetekben javít, és mely esetekben ront az LLL sűrűségkorrekció, ezért pozitív irányban van a hányados értéke, ha javít, és negatív irányban, ha ront. Természetesen mindig az F próbának megfelelően a nagyobb variancia van a számlálóban, ezért az értékek mindig egynél nagyobbak. A vízszintes vonalkák a 95%-os szignifikancia szinthez tartozó határokat jelölik.



67. ábra LLL sűrűségkorrekció hatása a szórásra száraz minták esetén; dielektromos állandók variációjának hányadosai felfelé: javít, hányadosok lefelé: ront, vonalak a 95 % szignifikanciaszinthez tartozó határok



68. ábra LLL sűrűségkorrekció hatása a szórásra nedves minták esetén; dielektromos állandók variációjának hányadosai felfelé: javít, hányadosok lefelé: ront, vonalak a 95 % szignifikanciaszinthez tartozó határok

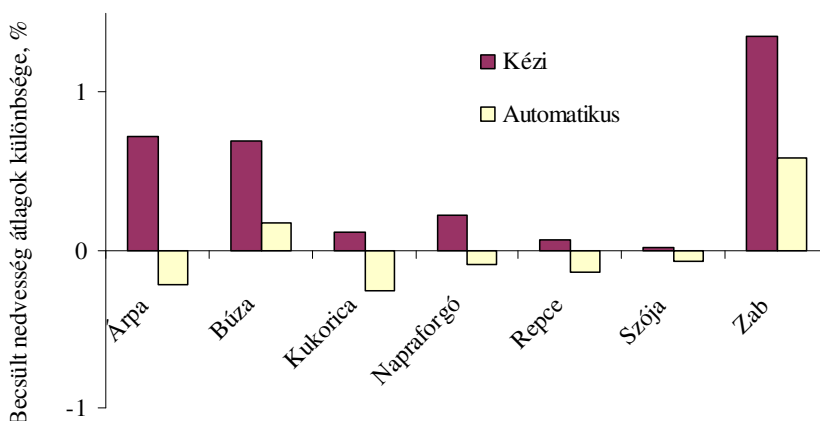
A várt eredmény, hogy az LLL csökkenti a szórást. Ezzel ellentétben különösen az automatikus betöltéssel, több gabonafajnál szignifikánsan rontott a szórás. A kézi betöltés esetén többnyire jelentősen javított. A tölcséresnél a nedves napraforgót leszámítva néhány esetben javított. Ez magyarázza, hogy a tömeg és a mért nedvességek szórásai miért különböztek.

Arra, hogy az LLL sűrűségkorrekció miért viselkedik így, a további eredmények ismeretében az 5.5.4 fejezetben adunk magyarázatot.

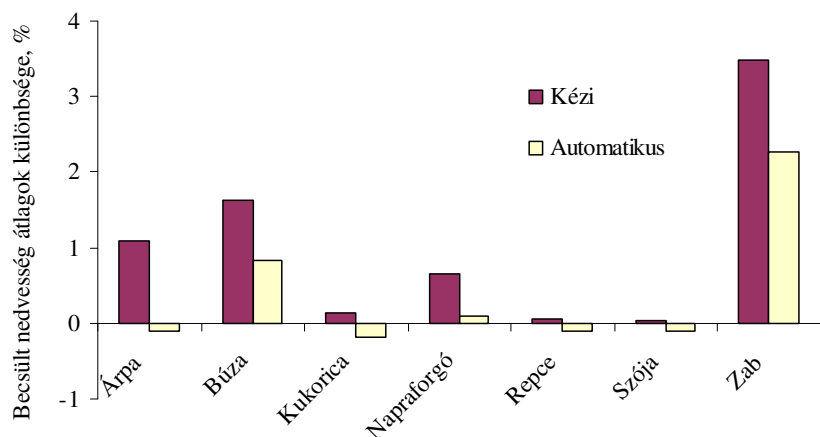
5.4.2 A nedvességmérési eredmények eltérése

A nedvességátlagok különbségének vizsgálatához a tölcséres betöltést vettük alapul, amihez viszonyítottunk. Azt vizsgáltuk, hogy a tölcséres betöltéshez képest a kézi és az automatikus betöltés alkalmazásával kapott nedvességek mennyire térnek el.

Az eredményeket a száraz mintákra a 69. ábra és a nedvesített mintákra a 70. ábra mutatja. A megbízhatósági tartományokat nem jelöltük, mert az eltérések pontos nagysága nem fontos, az csak az adott mintára jellemző érték, és jelentőségük a nagy ismétlésszám miatt elhanyagolhatónak adódott.



69. ábra A nedvességátlagok különbsége a tölcséres betöltéshez viszonyítva száraz mintákra



70. ábra A nedvességátlagok különbsége a tölcséres betöltéshez viszonyítva nedves mintákra

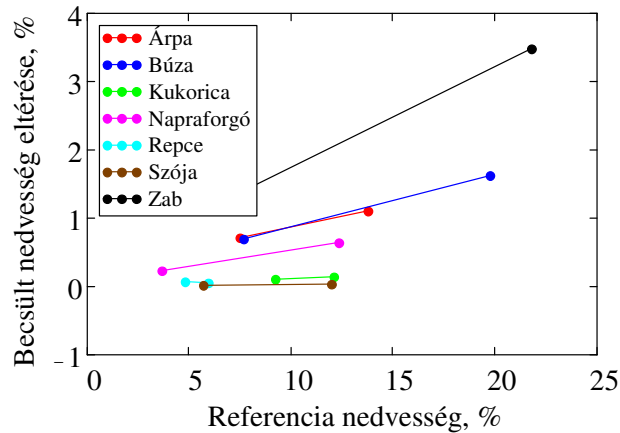
Az eredmény nagy meglepetést okozott. A 69. és 70. ábrán látható, hogy több gabona esetén gyakorlati szempontból jelentős különbségek adódtak, különösen árpa, búza és zab esetében. Ez azt jelenti, hogy az LLL sűrűségkorrekció ellenére a különböző betöltésekkel jelentősen különböző eredmények adódnak. Ez tűnhet egyértelműnek, viszont ezt leíró publikációt nem találtunk.

A betöltéseket tekintve az látható, hogy a kézi betöltés minden esetben nagyobb, míg az automatikus (a búzát és a zabot leszámítva) kisebb nedvességmérési eredményt adott, mint a

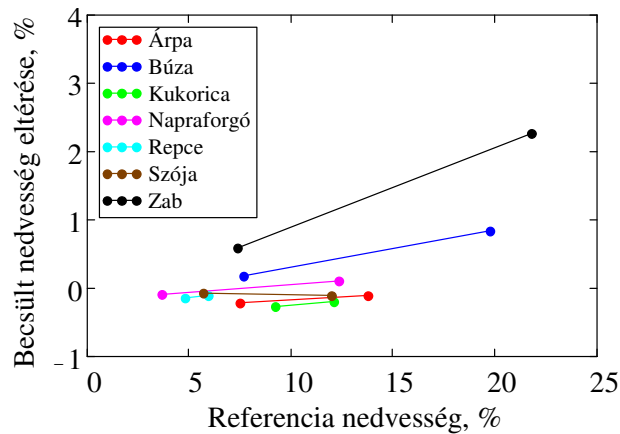
tölcséres betöltés alkalmazásával kapott nedvességmérési eredmény. Másrészt az eltérések nagyságai a kézi betöltés esetén markánsan nagyobbak.

5.4.2.1 A nedvességtartalom hatása az eltérésre

Fontos kérdés, hogy a nedvességek eltérése változik-e a nedvességtartalom függvényében. Amennyiben nedvességfüggetlen, abban az esetben egy gabonafajonkénti additív konstanssal korrigálni lehet. Ennek megállapítása céljából a becsült nedvességek különbségét a nedvességtartalom függvényében ábrázoltam a 71. ábrán a kézi és a 72. ábrán automatikus esetekre.



71. ábra A nedvességeltérés nedvességtartalom függése kézi betöltésre

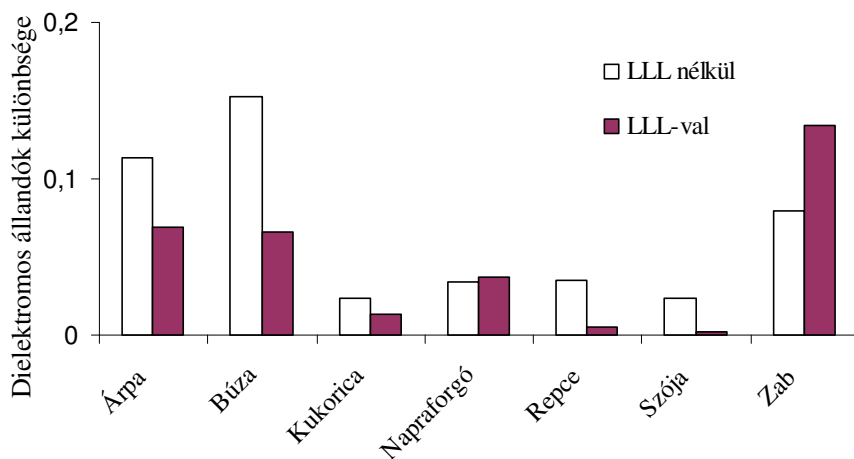


72. ábra A nedvességeltérés nedvességtartalom függése automatikus betöltésre

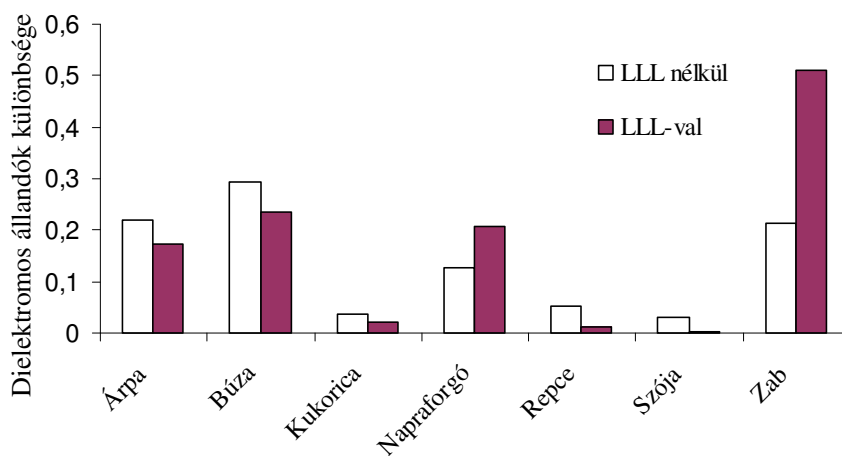
Látható, hogy a nedvességtartalom jelentősen hat a nedvességeltérésre, ami azt jelenti, hogy nem lehetséges a nedvességfüggetlen korrekció. Ezzel a "Kalibrációátvitel" fejezetben nagyobb mintaszámmal végzett mérések alapján még foglalkozom.

5.4.2.2 LLL sűrűségkorrekció hatása a nedvességkülönbségre

Az alábbiakban arra kerestük a választ, hogy az LLL sűrűségkorrekció milyen mértékben csökkenti a nedvességkülönbséget. Mivel a VHF-UGMA nedvességmérési algoritmus nem alkalmazható a sűrűségkorrigálatlan dielektromos állandóra, ezért a dielektromos állandók átlagának különbségét tekintjük LLL korrekció nélkül és LLL korrekcióval. A tölcséres betöltéshez viszonyítva látható a különbség kézi betöltésre (a száraz mintákra a 73. ábra, nedves mintákra a 74. ábra):



73. ábra A dielektromos állandók különbsége a kézi betöltésre a tölcséreshez viszonyítva száraz mintákra

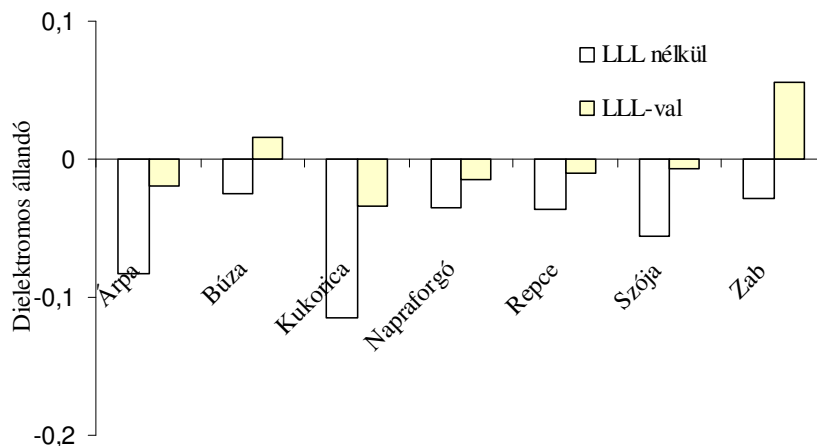


74. ábra A dielektromos állandók különbsége a kézi betöltésre a tölcséreshez viszonyítva nedves mintákra

Látható a kézi betöltésre, hogy a napraforgót és a zabot leszámítva minden esetben csökkenti a különbséget az LLL sűrűségkorrekció. Repce és szója esetén az elvárásoknak megfelelően közel

nullára korrigálja az eltérést, de a többi mintánál (árpa, búza és kukorica) kb. a felére száraz esetben és kb. 20%-kal a nedves esetben.

Az automatikus betöltés esetében (75. ábra) a hatás nagyon hasonló, kivéve a napraforgót, amelynél ebben az esetben kisebb lett a nedvességmérési különbség. Érdekes, hogy búza és zab esetén a különbség a negatívból pozitívba fordult.



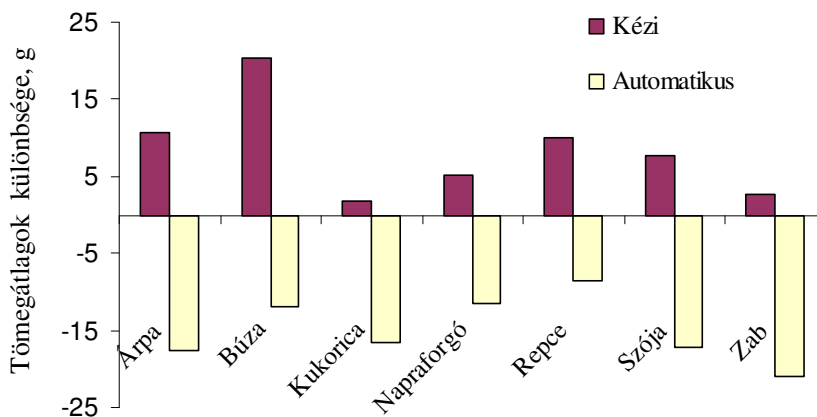
75. ábra A dielektromos állandók különbsége az automatikus betöltésre a tölcséreshez viszonyítva száraz mintákra

Ennek a viselkedésnek a részletes magyarázata az 5.5.4 fejezetben található, amihez szükséges még a nedvességmérési különbség okának feltárása.

5.4.3 A lehetséges okok vizsgálata

5.4.3.1 A sűrűségkülönbség hatása

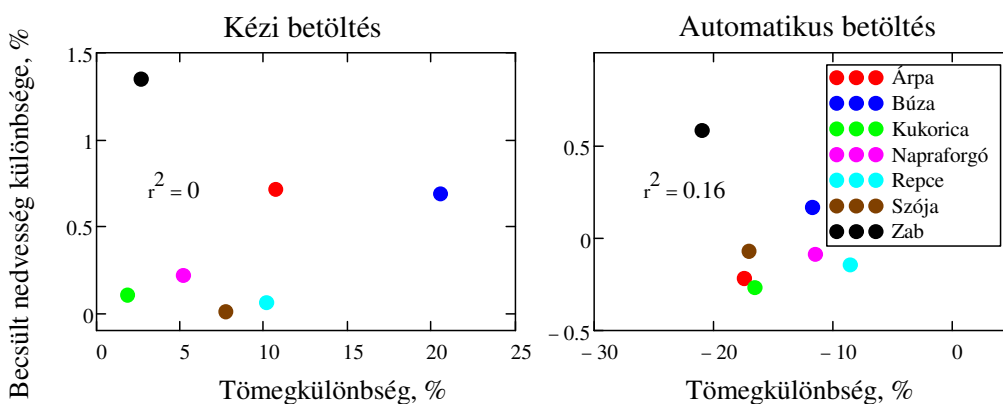
Egy kézenfekvő lehetséges ok a sűrűségek különbsége, amelynek nagy irodalma van. A kézi és automatikus betöltésekkel kapott tömegátlagok eltérését a tölcséres esetben kapott tömegek átlagához képest a 76. ábra mutatja. (A tömegértékek a M14. mellékletben láthatók.)



76. ábra Tömegátlagok eltérése a tölcséres betöltéstől száraz mintákra

Gyors betöltés esetén, amikor hirtelen, egy fémlap kirántásával zúdul alá a gabona, nincs idő a betömörödéésre és a rendezett eloszlásra, ezért a sűrűség kisebb lesz. A vizsgált betöltések is eszerint alakították a cellában lévő minták tömegét. A 76. ábra alapján látható, hogy a tölcséres betöltéshez viszonyítva a kézi betöltés mindig magasabb tömegértékeket eredményezett. Ez azt jelenti, hogy kézi betöltéssel több gabona került a mintatartóba, mint tölcséres betöltéssel. Az automatikus betöltés hatására minden gabonafajra kisebb lett a tömörödöttség, ezáltal a tömeg. Az eltérések nagysága az automatikus betöltésre általában nagyobbak adódtak.

A következőkben megvizsgáljuk, hogy a nedvességkülönbség korrelál-e a tömegkülönbséggel. A 77. ábrán a tömegkülönbségek függvényében láthatjuk a nedvességkülönbségeket kézi és automatikus betöltésekre. Az ábrákon a determinációs tényező is látható.



77. ábra Tömegkülönbségek és nedvességeltérések közötti összefüggés

A 77. ábrán látható, hogy semmilyen kapcsolat nem mutatkozik a nedvességkülönbség és a tömegkülönbség között. Ez azt jelenti, hogy a tömegkülönbség nem lehet oka a nedvességkülönbségnek, másrészt azt is jelenti, hogy az LLL sűrűségkorrekció eltüntette a sűrűségkülönbségből eredő nedvességeltérést.

5.4.3.2 A szem alakjának hatása

A nedvességeltérést bemutató ábrákat (69. ábra, 70. ábra) szemlélve felismertük, hogy a hosszúkás gabonafajokra általában nagyobb nedvességmérési eltérés mutatkozott.

A feltételezésünket statisztikailag is megvizsgáltuk. Ehhez szükség volt a gabonák geometriai méreteire, amelyeket több szem mérésével és átlagolásával kaptunk. A mérési eredmények átlagait a 10. táblázat tartalmazza.

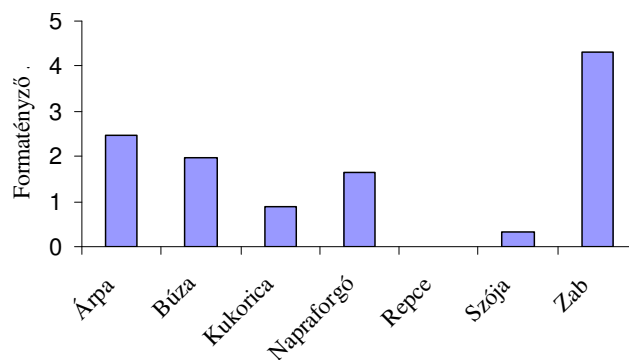
10. táblázat Az általunk mért gabonaszemek geometriai méretei

	Legnagyobb átmérő (mm)	Közepes átmérő (mm)	Legkisebb átmérő (mm)
Árpa	9,44	3,07	2,4
Búza	7,19	2,74	2,15
Kukorica	10,72	7,58	4,21
Napraforgó	9,73	5,26	2,58
Repce	1,8	1,8	1,8
Szója	8,15	6,66	5,57
Zab	11,92	2,51	2

A vizsgálathoz az alábbi formatényezőt használtuk, amely a szemek "hosszúakasságát" hivatott jellemezni, és nullát ad, abban az esetben, ha a gabonaszem gömb alakú.

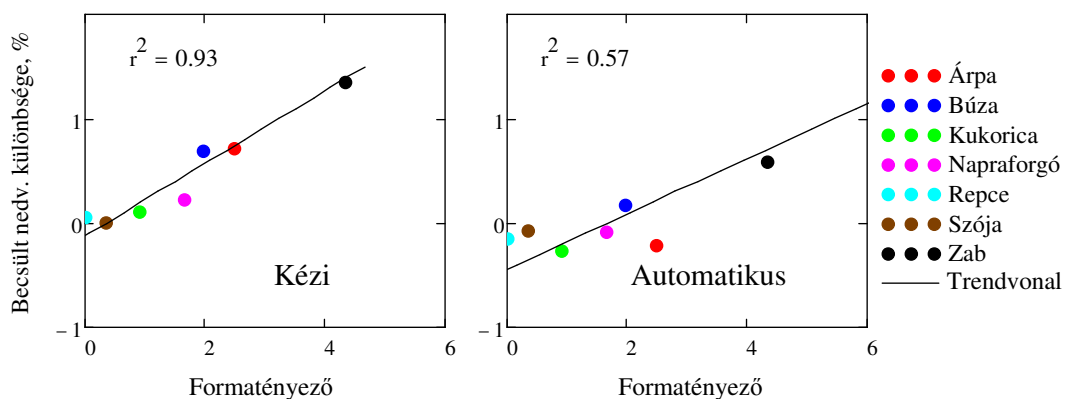
$$FT = \frac{d_x}{\sqrt{d_y \cdot d_z}} - 1 \quad (88)$$

ahol d_x a legnagyobb átmérő, d_y és d_z a másik két átmérő. A formatényező értékeit az egyes gabonafajokra a 78. ábra szemlélteti:



78. ábra A formatényező értékei a hét gabonafajra

A kapott formatényező értékei és nedvességeltérések közötti összefüggés a 79. ábrán látható.



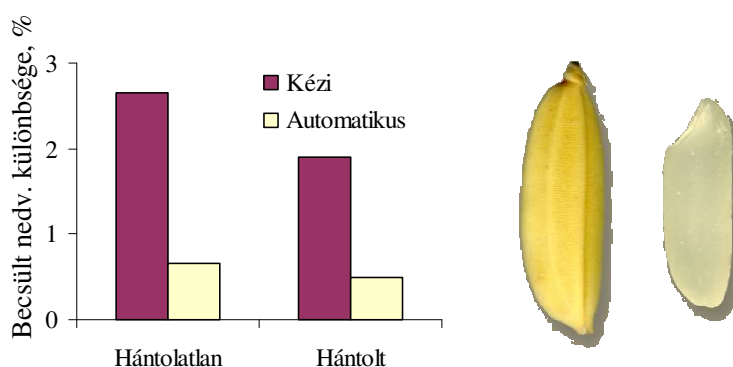
79. ábra Formatényezők és nedvességeltérések közötti korrelációs vizsgálat

A 79. ábrán jól látható, hogy az általunk definiált formatényező jól korrelál a nedvességkülönbséggel. A kézi betöltés esetén az r^2 értéke 0,93, automatikus betöltés esetén az r^2 értéke 0,57. Ezek az eredmények a feltevésünk igazságát bizonyítják, miszerint a hosszúkas gabonafajok nagyobb nedvességeltérést mutatnak. De miért van jó korreláció a kézi esetben és miért csak kielégítő az automatikus esetben? Ennek megválaszolásával a 5.5 fejezetben foglalkozom.

5.4.3.3 A héj hatása

Felmerült még, hogy a gabonaszemek héjának van valamilyen hatása a különböző betöltések között lévő nedvességmérési eltérésekre. Minden gabona rendelkezik a belső magszerkezettől különböző héjjal, melynek elektromos tulajdonságai, főleg a vezetőképessége különbözhet.

A kérdés az volt, hogy mekkora hatása van a héjnak a nedvességkülönbség kialakításában. Ennek eldöntéséhez jó mintának adódott a rizs, mely könnyen elérhető héjjal és héj nélkül, és a mag belseje homogénnek tekinthető. Azt feltételeztük, hogy a hántolt rizs jelentősen kisebb eltérést fog mutatni. A mérés során hántolatlan (nedvességtartalom: 14,9 %) és hántolt rizst (nedvességtartalom: 15,1 %) mértünk a háromféle betöltéssel háromszoros ismétléssel. A 80. ábra a tölcéses betöltéshez viszonyított nedvességmérési eltéréseket mutatja.



80. ábra Hántolatlan és hántolt rizs kézi és automatikus betöltéssel mért nedvességének különbsége

Látható, hogy a nedvességmérés különbségei csak kis mértékben kisebbek a hántolt esetben, ennek a kisebb szemméret lehet az oka. Így látható, hogy a héjnak nincs különös szerepe a nedvességkülönbség megjelenésében.

5.5 A GABONASZEMEK TÉRBELI ORIENTÁCIÓJÁNAK HATÁSA

A nedvességkülönbség okának keresése során egy érdekes megfigyelést tettünk. A betöltések során észrevettük, hogy a tölcséres betöltés esetén a gabonaszemek ahogy a kialakuló gabonahalmazon lecsúsznak, a tesztcella hosszanti irányában elrendeződve helyezkednek el.

5.5.1 A szemek orientációja tölcséres, gyors és kézi betöltés hatására

Annak érdekében, hogy a szemek orientációjának mértékét és irányát megfigyelhessük, készítettünk egy átlátszó dobozt, amelyben a gabona elrendeződése fényképezhető oldalról. A doboz a M7. mellékletben látható. A következő ábrán (81. ábra) egy árpaminta oldalnézeti képe látható az átlátszó cellában tölcséres, kézi és automatikus betöltés alkalmazásával. További gabonafajokra a M10. mellékletben találhatók oldalnézeti képek.



81. ábra Árpaminta oldalnézeti képe az átlátszó dobozban

Másrészt készítettünk fényképeket gabonákról felülnézetből. A következő 82. ábra egy zabmintát mutat. További gabonafajok felülnézeti képei a M15. mellékletben találhatóak.



82. ábra Zabminta felülnézeti képe a mester tesztcellában

Az oldalnézeti képeken jól látható, hogy a tölcséres és a kézi betöltés esetén a gabonaszemek oldal irányban orientáltak, míg az automatikus betöltésnél rendezetlenség figyelhető

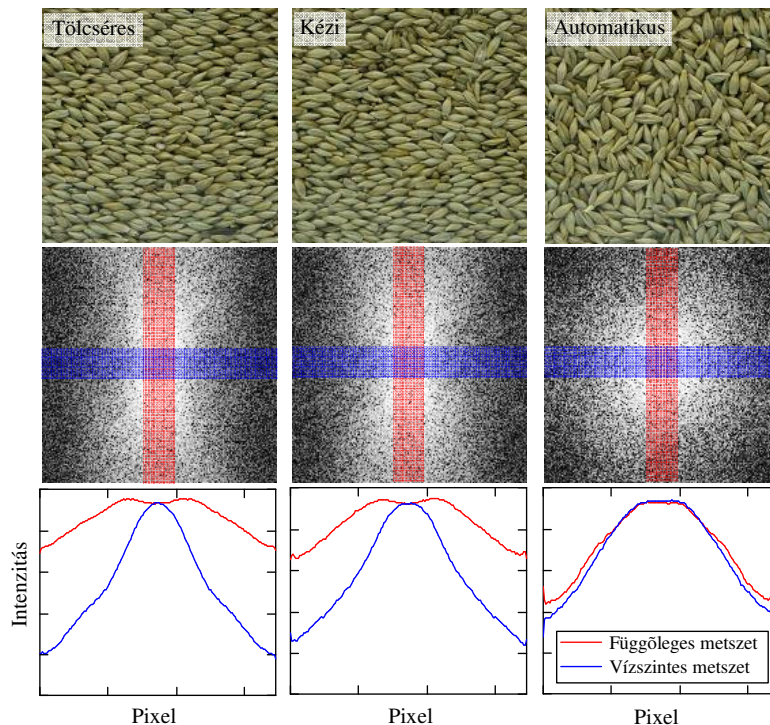
meg. A felülnézeti ábrák vizuális értelmezése nem ennyire egyértelmű, de megfigyelhető, hogy a felülnézeti ábrákon a tölcséres betöltés mutat a lemezekkel egyező irányú rendezettséget, a kézi betöltésnél a lemezekre merőleges rendezettség tendenciái fedezhetők fel.

Mivel a felülnézeti képek alapján a szemek orientációjának iránya és mértéke vizuálisan nem állapítható meg kellő bizonyossággal, ezért fontossá vált, hogy valamilyen matematikai módszerrel a szemek orientáltságának irányát és mértékét számszerűsítsük.

5.5.1.1 2-dimenziós Fourier transzformált

A képfeldolgozásban régóta ismert módszer a 2D Fourier transzformáció, amellyel egy adott képen a periodicitás nagyságát és irányát lehet jellemezni. Így merült fel, hogy a szemek orientációjának, nagyságának és irányának objektív jellemzésére a 2D Fourier transzformált alkalmas lehet.

A módszert az oldalnézeti képeken mutatom be, amelyeken az orientáció iránya vizuálisan is egyértelmű. A 83. ábra első sora egy árpaminta tölcséres, kézi és automatikus betöltéssel kapott elrendeződésének oldalnézeti képeit tartalmazza, a második sor ezen képek 2D Fourier transzformáltjait.



83. ábra Árpaminta oldalnézeti képei, 2D Fourier transzformált képei és az intenzitás diagramok

A képek alapján látható, hogy a 2D Fourier transzformált képeken a fehér pontok felhője függőlegesen elnyújtott, ha a szemek horizontális irányban orientáltak, ami a tölcséres és a kézi betöltés esetén látható. Amennyiben a szemek rendezetlenek, abban az esetben a fehér pontok

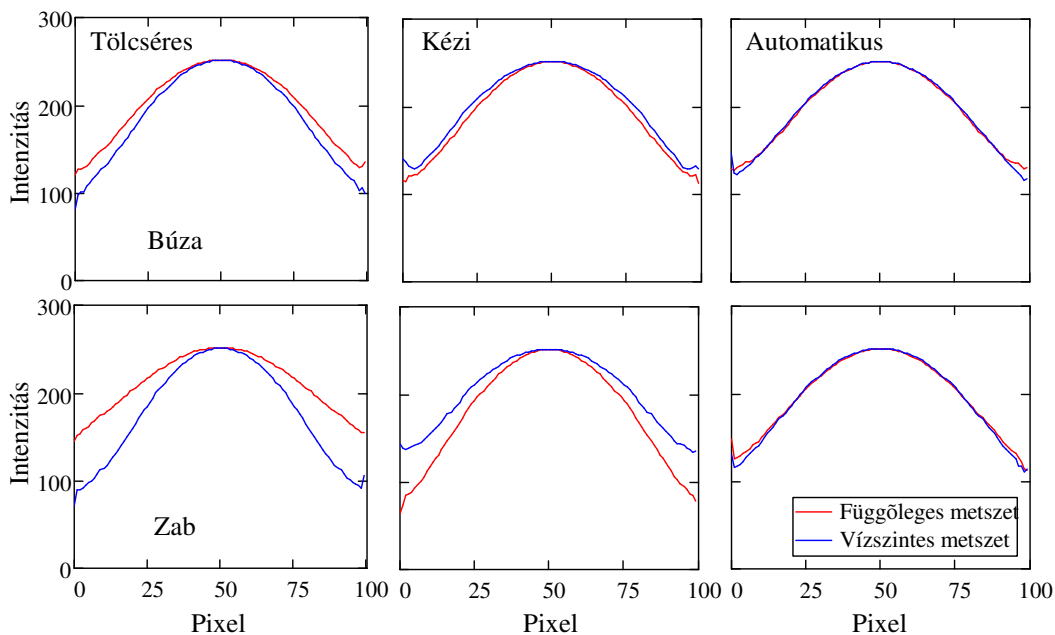
felhője körszimmetrikus, amint az automatikus betöltés esetén látható. Nyilvánvaló, hogy ha a szemek függőleges irányban lennének orientálva, abban az esetben a fehér pontok felhője vízszintes irányban lenne elnyújtott.

Ahhoz, hogy a pontfelhő alakját objektíven szemlélhessük, a 2D Fourier transzformált képek függőleges és vízszintes középvonal menti intenzitását ábrázoltam. Mivel a diszkrét pontok miatt a görbe nagyon "zajos" lenne, ezért a 83. ábrán látható 10 pixel széles függőleges (piros) és vízszintes (kék) sávokban a középsőt kihagyva átlagoltuk az intenzitást, és simítottuk. Az intenzitás értékek a kép középvonala mentén függőleges illetve vízszintes irányban a 83. ábra harmadik sorában lévő képeken láthatók. Az intenzitás diagramokon látható, ha a szemek orientáltságának iránya vízszintes, akkor a vízszintes intenzitási diagram lejjebb van, mint a függőleges irányban felvett.

A módszer természetesen fejleszhető. Például lehetne számszerűsíteni a szemek orientációjának irányát és nagyságát a diagramok alapján, az egyes gabonafajokra meghatározott összefüggésekkel. Ehhez referenciaérték lehet például a képen a függőleges és vízszintes szemek aránya, amely akár már önmagában is elegendő. Ehhez több munka és szigorú definíciók szükségesek. Erre viszont semmi szükség, mert ahhoz, hogy a szemek orientációjának tendenciáit bizonyítsuk, a módszer ebben a formában is elégséges.

5.5.1.2 A szemek orientációja a felülnézeti képeken

A 84. ábrán búza és zabminta felülnézeti képeiből származtatott intenzitás diagramok láthatók tölcséses, kézi és automatikus betöltésre.



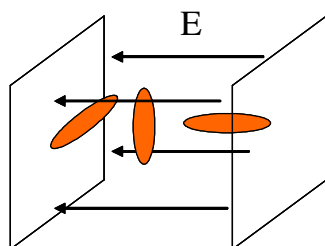
84. ábra 2D Fourier transzformált képek intenzitás diagramjai

A 84. ábra és az intenzitás diagramok értelmezéséből következik, hogy a tölcséres betöltés esetén a búza és a zabminták vízszintes, azaz a cella hosszanti irányában; kézi betöltés esetén függőleges, azaz a cellára merőleges irányban mutatnak a szemek orientációs tendenciát. Az automatikus esetben a szemek rendezetlen voltára lehet következtetni. Ezekből a megfigyelésekből egyértelműen kiderül, hogy a betöltések orientálják a gabonaszemeket.

5.5.2 A szemek iránya és a nedvességkülönbség kapcsolata

Ebben a szakaszban az előbbieken bemutatott orientációs megfigyelések és a különböző betöltések alkalmazásával kapott nedvességmérési különbségek közötti összefüggéseket mutatom be.

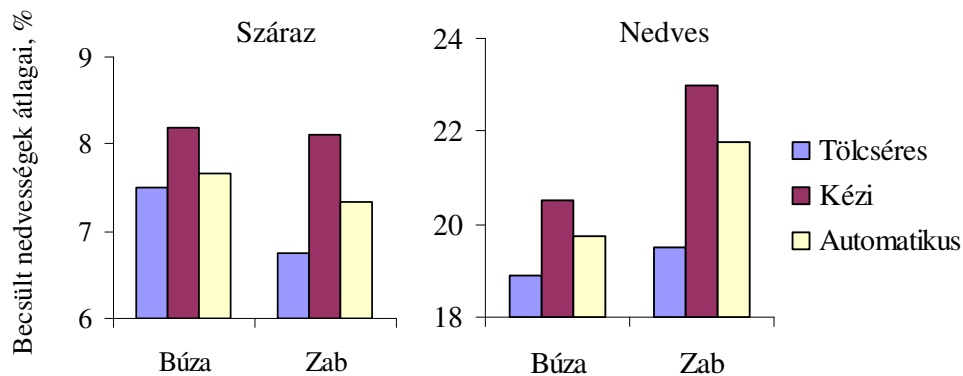
Ismert, hogy az ellipszoidok a fő tengely irányában csökkentik legjobban a teret (Tinga et al. 1973a), ami azt jelenti, hogy ebben az irányban mutatnak legnagyobb dielektromos állandót. Másrészt, mivel a cella TEM módban működik, ezért az elektromos tér a cella oldalaira merőleges. Az elektromos térhez képest a szemek három fő irányban lehetnek (85. ábra).



85. ábra A gabonaszemek fő irányai

Ezekből kettő merőleges az elektromos tér vektorára és egy párhuzamos. Ezek szerint mindegy, hogy függőlegesen vagy vízszintesen a cella lemezeivel párhuzamosan orientálódik, csak az számít, hogy a szemek párhuzamosak-e a lemezekkel vagy arra merőlegesek. Ennek eldöntésében csak a felülnézeti képek segítenek.

A felülnézeti képek alapján a tölcséres betöltés hatására a szemek a cella falával párhuzamosan az elektromos térre merőleges orientációs tendenciát mutattak, ami a legkisebb dielektromos állandót eredményezte. Ehhez képest a kézi betöltés a cella falára merőleges, az elektromos térrel párhuzamos tendenciát mutatott, ami a legnagyobb dielektromos állandót eredményezte. Az automatikus esetben rendezetlenség volt a jellemző, amely egy köztes dielektromos állandót adott. A "Betöltés hatása a nedvességmérésre" című fejezetben bemutatott nedvességmérési eltérések helyett (68. és 70. ábra) a tényleges nedvességmérési eredmények láthatók a búzára és zabra (86. ábra), mint két jellemző hosszúkás szemű gabonafajra, és amelyek esetében legnagyobbak voltak a különbségek:

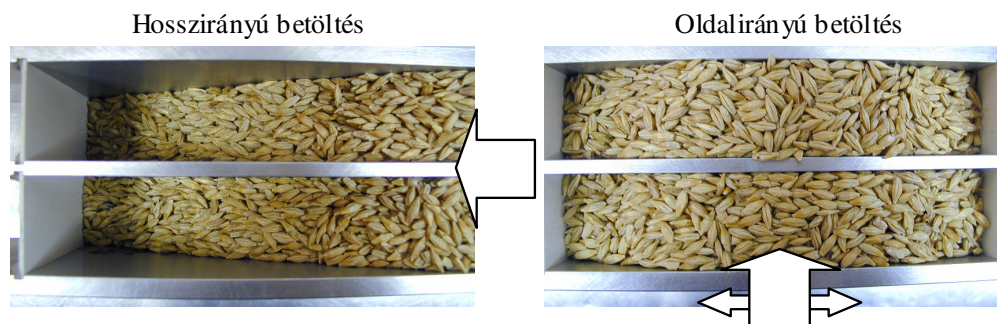


86. ábra Becsült nedvességek átlaga száraz és nedves mintákra

Látható, hogy az okfejtés ezekkel az eredményekkel teljesen egybevág. A többi hosszúkás gabonára kézi betöltés esetén ugyanez volt megfigyelhető (68. és 70. ábra). Az automatikus betöltés esetén viszont több gabonafajra az automatikus betöltés eredményezett a tölcsésesnél kisebb nedvességet, még a gömb alakú szemek esetén is, aminek a korábbi vizsgálatok alapján nem valószínű, hogy a tömegkülönbség az oka. Mivel ez egybevág az üveggolyók esetében (27. ábra) az automatikus betöltés alkalmazásakor tapasztalt indokolatlanul kicsi dielektromos állandóval, feltételezhető, hogy esetleg valamilyen "kristályszerkezeti" ok van a háttérben.

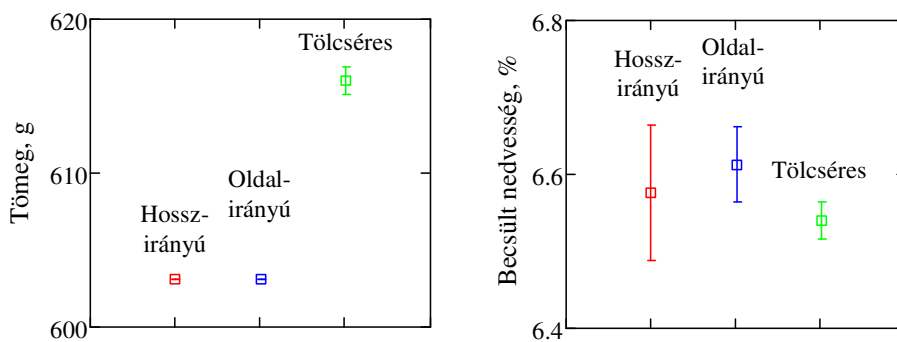
5.5.3 Közvetlen bizonyíték az orientáció hatására

Az előző eredményeket megerősítendő egy speciális méréssel kívántuk alátámasztani és szemléltetni feltevésünket, miszerint a mért gabonanedvesség különbsége a gabonaszemek orientációjának nagyságának és irányának különbsége miatt van. Azt a megfigyelést használtuk ki, hogyha a cellát hosszanti irányból oldalról töltöttük be (87. ábra), akkor a szemek egy jelentős része a cellával párhuzamosan orientálódott amiatt, hogy a kialakult halmazról csúsztak le. Ezzel szemben, ha a gabonát oldalirányból töltöttük be ide-oda mozgatva, akkor más orientációt mutatott. A betöltés sebességével szabályozni lehetett a gabonahalmaz sűrűségét, ezért az előmérések során úgy határoztuk meg a betöltések sebességét, hogy a kétféle betöltéssel azonos mennyiségű gabona legyen a cellában a mérések során. A méréshez száraz szóját és árpat használtunk.



87. ábra Adott irányú betöltések zabra és szójára, a fehér nyilak a betöltés irányát mutatják

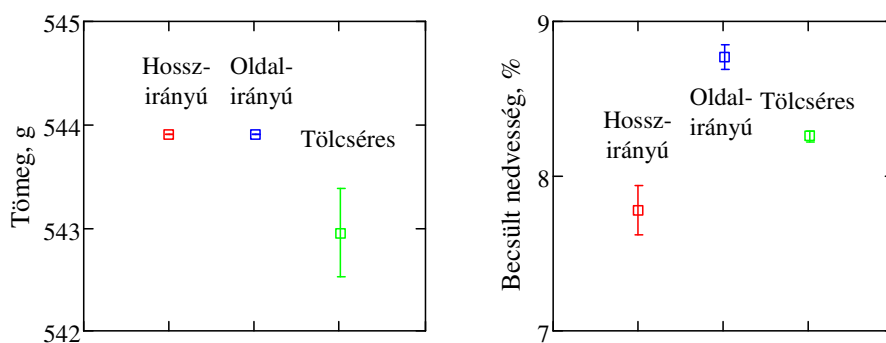
A szójamérések eredményei, mint kontroll csoport, a következő 88. ábrán láthatók.



88. ábra Szója mérési eredményei hosszirányú, oldalirányú és tölcséres betöltéssel; négyzet: átlagérték; vonal: 95%-os megbízhatósági intervallumok

Látható, hogy a kétféle betöltés alkalmazásával kapott eredmények és a tölcséres mérések gyakorlati szempontból azonos eredményeket adtak annak ellenére, hogy a tölcséres esetben a tömegek átlaga 13 g-mal nagyobbak adódtak.

Az árpa mérési eredményei 89. ábrán láthatók:



89. ábra Árpa mérési eredményei hosszirányú, oldalirányú és tölcséres betöltéssel

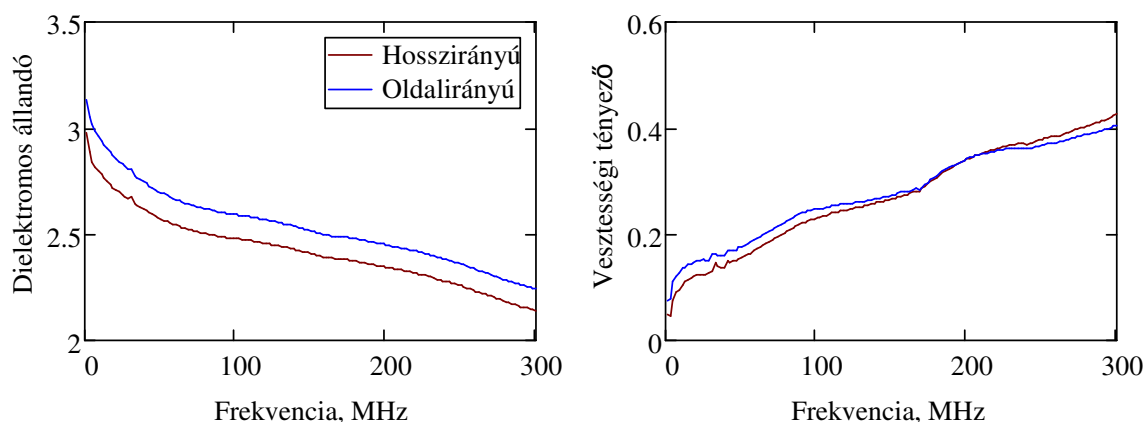
A 89. ábra jobb paneljén látható, hogy a nedvességek eltérése közel 1 %, ami igen nagy, főleg, ha figyelembe vesszük, hogy azonos gabonamintáról, azonos mérőeszközzel és azonos mennyiségről van szó. A tölcséres mérés eredménye a két szélsőséges betöltés között helyezkedett el, míg a tömeg 1g-mal volt kisebb, mint a két kézi betöltés esetén. Az M16. mellékletben egy másik érdekes példa található.

Ezekből a mérésekből jól látható, hogy ha a szemek orientációjának irányában vagy mértékében különbség van, akkor nedvességmérési különbség adódik hosszúkás gabonaszemek esetén.

5.5.3.1 Az orientáció hatása a mért permittivitásra

Tudományos szempontból érdekes, hogy a komplex permittivitás hogyan változik a frekvencia függvényében. Ebben az irányban nem végeztünk külön kutatást, de a hosszirányú és oldalirányú betöltés során rendelkezésre álltak az ezzel kapcsolatos eredmények.

A 90. ábra a zabminta hosszirányú és oldalirányú betöltésével kapott dielektromos állandót és a veszteségi tényezőt ábrázolja a frekvencia függvényében.



90. ábra Zabminta permittivitása a két különböző irányú orientációs állapotban

A 90. ábrán látható, hogy a dielektromos állandók a teljes frekvenciatartományban azonos mértékben különböznek, míg a veszteségi tényező nem mutat állandó különbséget. Ez az eredmény azt is bizonyítja, hogy a nedvességmérés különbsége - ami a dielektromos állandón alapul - nem egy adott frekvenciatartományra korlátozódik.

5.5.4 Lehetséges korrekciók

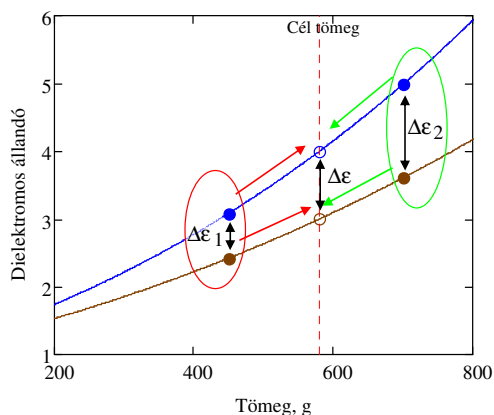
A fenti mérésekkel sikerült bizonyítani, hogy a különböző betöltések alkalmazásával mért nedvességek különbségei a gabonaszemek - a betöltésre és magra jellemző irányú és fokú - orientációja miatt vannak. Mi következhet ebből? Ebből egyenesen következik, hogy a VHF-UGMA nem alkalmazható közvetlenül egy másik betöltést alkalmazó mérőberendezésen. Másodsorban, ha egy adott betöltést alkalmazó mérőberendezés esetén a felhasználó miatt változik a gabonaszemek orientációjának foka vagy iránya a kalibráció során alkalmazottól, akkor az adott mérések nem lesznek pontosak. Harmadsorban minden eddig, az irodalomban megjelent permittivitás érték nem pontos vagy nem reprodukálható, ha nem ismert a szemek orientációjának mértéke és iránya, vagy a betöltés pontos módja. Tehát felmerül az igény megfelelő sűrűség és most már orientációkorrekció fejlesztésére. Ennek van elvi és gyakorlati lehetősége is. A következőkben az általunk felismert lehetőségeket veszem sorra.

5.5.4.1 Korrekciók a VHF-UGMA-hoz

Amennyiben a VHF-UGMA kalibráció átvitelét szeretnénk megoldani egy más betöltést alkalmazó rendszerre, akkor az egyik lehetőség, hogy az adott betöltésre gabonafaj-függő korrekciókat határozzunk meg mérésekkel. Ennek lehetőségét az utolsó fejezetben vizsgáljuk. A másik lehetőséget a keverékformulák kínálják.

A szakirodalomban sok keverékformula ismert, amelyekkel egy keverék dielektromos állandója becsülhető, vagy éppen a keverék dielektromos állandójából egy sztenderdnek vett tömegű keverék dielektromos állandója becsülhető. Lehetséges, hogy egyszerűen keresni kell egy megfelelő keverékformulát? Ennek elvi akadályai látszanak. A dielektromos elméletben jól ismert, hogy egy keverék dielektromos állandója függ az összetevők dielektromos állandóján kívül ezek térfogatarányától, a szemcsék alakjától és orientációjától. Az egyes keverékformulák ezeket mind valamilyen paraméterrel veszik figyelembe. Tehát lehetséges, de akkor ezeket a paramétereket kell meghatározni az egyes betöltésekre és gabonafajokra. Mivel a gabonák orientációja nem határozható meg elméletileg, ezért ezeket ugyancsak mérésekkel kell meghatározni. A kapott korrekció csak egy adott betöltésre alkalmas, továbbá kérdéses, hogy a különböző nedvességtartalmú mintákra hogyan viselkednek. Az már csak technikai jellegű probléma, hogy ezekből a keverékformulákból még matematikailag sűrűségkorrekciót kell készíteni, ami egy ilyen összetett függvény esetén csak iteratív számolás lehetne.

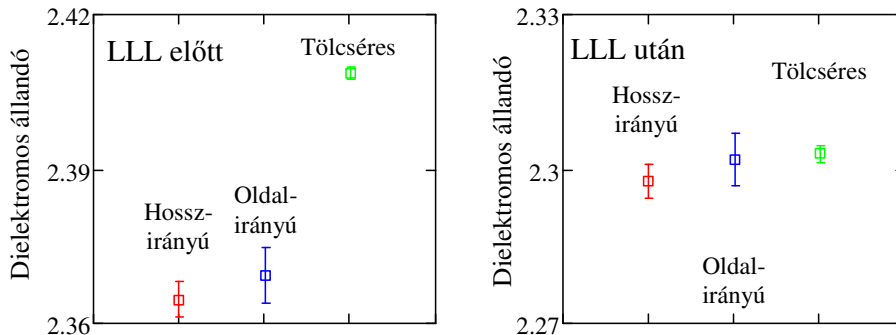
Az LLL sűrűségkorrekció miért nem működik jól? A nyilvánvaló ok, hogy nem veszi figyelembe a szemek orientáltságát. Ezzel kapcsolatban a következő ábra szemléletesen mutatja, hogy mit is csinált az LLL. Ezzel lehet megérteni azokat a mérési eredményeket, amelyeket korábban ismertettem. A 91. ábra azt az esetet mutatja, amikor két minta dielektromos állandója nem a sűrűségkülönbség miatt különbözik, hanem például a két minta ugyanaz, csak a betöltés hatására más a szemek orientációja, mint a hosszanti és oldalirányú betöltés esetében volt. Az egyik minta dielektromos állandója a kék vonalon változik, adott térfogat esetén a minta tömegétől, a másik a barna vonalon. A piros szaggatott vonal a céltömeget jelöli.



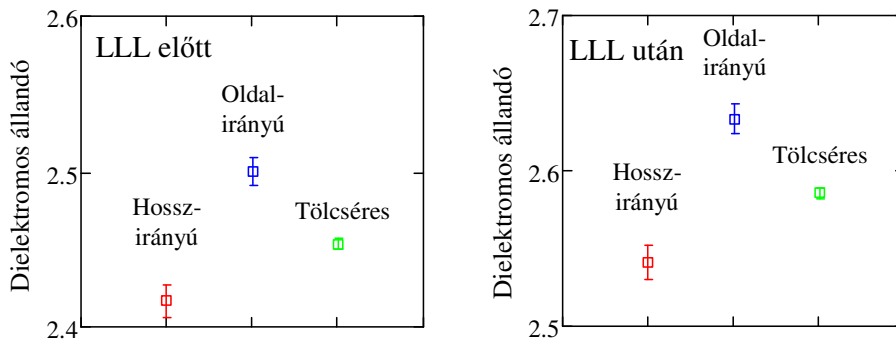
91. ábra Az LLL sűrűségkorrekció hatása orientációból eredő különbség esetén

Abban az esetben, amikor a két minta tömege (piros karika) kisebb mint a céltömeg, akkor az ábrán jól látszik, hogy a minták dielektromos állandójának különbsége ($\Delta\epsilon_1$) a korrekcióval nő. Amennyiben a tömegük nagyobb (zöld karika) mint a céltömeg, akkor a dielektromos állandó különbsége ($\Delta\epsilon_2$) csökken. A többi - az orientációt külön paraméterrel figyelembe nem vevő - sűrűségkorrekciók csak a görbe alakjában különböznek, ezért más viselkedés nem várható.

A következőkben az LLL hatása a mérési eredmények alapján figyelhető meg. A számítás természetesen elvégezhető tetszőleges értékekkel is.



92. ábra Szója mérési eredményei hosszirányú, oldalirányú és tölcséres betöltéssel



93. ábra Árpa mérési eredményei hosszirányú, oldalirányú és tölcséres betöltéssel

A kézi betöltéseknél a szója és az árpa a tömegei azonosak voltak, így sűrűségkülönbség nem lehetett. A LLL sűrűségkorrekció általános hatása az ábrákon jól látható, hogy ha tömegkülönbség van, akkor az LLL jól működik. A hosszirányú és oldalirányú betöltések különbségeinek elemzéséhez a 11. táblázat eredményeit tekintjük:

11. táblázat Árpa és szója dielektromos állandójának különbsége oldalirányú és hosszirányú betöltéssel

	Dielektromos állandók különbsége sűrűségkorrekció nélkül	Dielektromos állandók különbsége sűrűségkorrekcióval	Minták tömege (g)
Árpa	84×10^{-3}	92×10^{-3}	543,9
Szója	$4,6 \times 10^{-3}$	$4,4 \times 10^{-3}$	603,1

Ez a hosszirányú és az oldalirányú betöltés alkalmazásával kapott dielektromos állandók különbségeit mutatja, ami a 91. ábra $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_2$ és $\Delta\varepsilon$ értékeinek felel meg.

Látható, hogy az árpa esetén - melynek a tömege kisebb a 580 g-os céltömegnél - a különbség nő. Míg a szójánál - melynek a tömege nagyobb, mint a céltömeg - a meglévő parányi különbség természetesen csökken.

5.5.4.2 Korábbi eredmények magyarázata

Az előzőekkel magyarázhatjuk, hogy miért tapasztaltuk az 5.4 betöltések hatását vizsgáló fejezetben, hogy a nedvességmérési eredmény különbsége a nagyon könnyű napraforgó és zab esetében az LLL sűrűségkorrekció hatására nőtt. Miért csökkent kisebb mértékben a dielektromos állandók különbsége a nedves esetben? A nedves gabonák dielektromos állandója nagyobb, és ezért az orientációból adódó különbség is nagyobb. A nedves minták tömege kisebb, ezért a tömegből adódó különbség is kisebb lehet. Ezért a nedves minták esetén az orientációs különbségből adódó különbség aránya a sűrűségkülönbségből adódó különbséghez képest nagyobb volt. Az LLL csak a sűrűségkülönbségből adódó különbséget csökkenti, így a nedves gabonák esetén a különbségsökkenés arányában kisebb, mint száraz gabonák esetében.

A különböző betöltések szórásának javulása illetve romlása a LLL sűrűségkorrekció miatt ezek ismeretében a következőképpen magyarázható. A kézi betöltés azért mutatott általánosan javulást, mert a betöltés módja nagyon kontrollált volt, az ismétlésekkor nem történhetett változás a szemek orientációjában. Viszont a sebességet nehéz volt kontrollálni, amiből sűrűségkülönbségek adódtak, ezt az LLL jól korrigálja. A tölcseres betöltés nagyon konzisztens, ezért a javulás mértéke kisebb volt, mint a kézi betöltés esetén. Az automatikus betöltés esetében, mivel akkor még nem tudtuk, hogy a szemek orientációjának ilyen nagy szerepe van, nem ügyeltünk arra, hogy az ejtő dobozba milyen módon töltjük a mintát. Ezért a betöltés előtt a dobozban a gabonaszemek orientációja változhatott. A beejtés során ez az orientációs tendencia a cellába tovább kerülhetett. A nedvességmérés szórásában az orientáció varianciája játszott a főszerepet, és ezért a kis tömegű magoknál (napraforgó és zab) az LLL csak növelte a különbségeket, vagyis a szórást.

5.5.4.3 Technikai ötletek

Számos technikai ötlet merült fel a probléma megoldására. A minta fluidizálása levegővel, keverés, rázás és kamera beépítése. Ezekkel az a gond, hogy az eredeti kalibrációt ez nem változtatja, csak az új modellbe lehetne beépíteni. De mit oldanának meg? Az első három módszer az orientáció egységesítését szolgálja, a kamera pedig az adott minta orientációját hivatott észlelni. Ezekkel szembeállítva például egy jó automatikus betöltést, az adott konfigurációban állandó orientációs hatást fog eredményezni, így a fenti technikai ötleteknek nincs semmi további előnyük.

5.6 A NEDVESSÉGMÉRÉSI KALIBRÁCIÓ ÁTVITELE

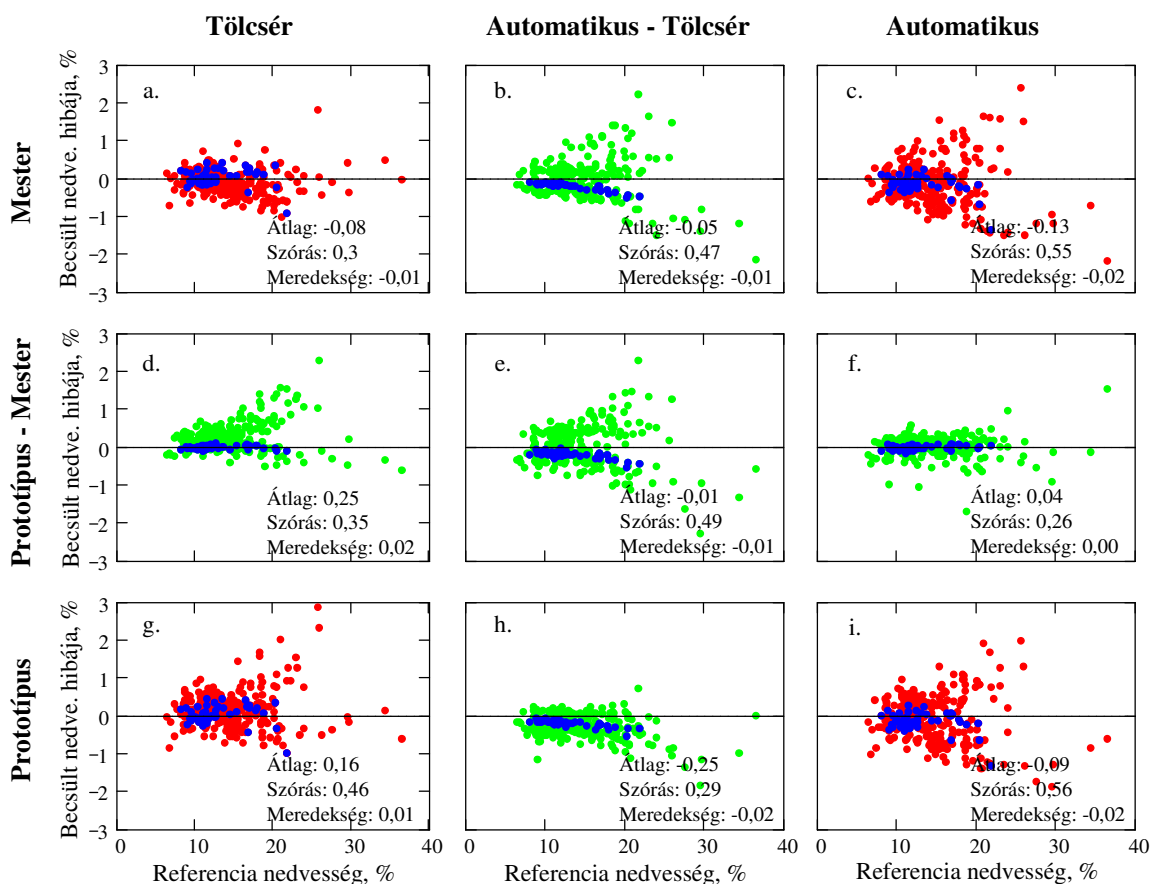
A gyakorlati mérés technikában nagy igény van arra, hogy egy adott mérőműszeren elkészített kalibrációt más mérőműszeren is alkalmazhassanak, ezzel elkerülve a sokszor hosszadalmas és költséges méréseket. Ebben a fejezetben bemutatom, milyen eredményes a mester tesztcellán fejlesztett VHF-UGMA nedvességmérési algoritmus más tesztcellán és más betöltéssel.

A vizsgálatokhoz 324 gabonamintát mértünk, amelyek 8 különböző gabonafajt képviseltek (3. táblázat). A mintákat a mester és a prototípus tesztcellán mértük a tölcséres és az automatikus betöltés alkalmazásával. Négyféle variáció volt: a mester tesztcella tölcséres betöltéssel (a továbbiakban mester/tölcsér), a mester tesztcella automatikus betöltéssel (továbbiakban mester/automatikus), a prototípus tesztcella tölcséres betöltéssel (továbbiakban proto/tölcsér), és a prototípus tesztcella automatikus betöltéssel (továbbiakban proto/automatikus).

A prototípus tesztcella paramétereit az "5.3 Tesztcella sztenderdizáció" fejezetben leírtak alapján kaptuk. A kalibrációátvitel vizsgálatához a szójamintákkal végzett, csak 149 MHz-en mért dielektromos állandón alapuló sztenderdizációval kapott paramétereket használtuk.

5.6.1 Korrekció nélküli kalibrációátvitel

Az eredmények a következő panelábrán láthatók (94. ábra). Az ábra szerkezete a következő: a sarkokban lévő ábrák (a, c, g és i) a szárítószekrényhez viszonyított nedvességmérési eltéréseket mutatják (továbbiakban: a nedvességmérés hibája), az ezek között lévő ábrák (b, d, e, f, és h) a különböző tesztcellák és/vagy betöltésekkel kapott nedvességmérési eredmények egymáshoz képesti eltérését mutatják (továbbiakban: nedvességmérési eltérések). A kék pontok a sztenderdizációhoz használt szójamintákat jelölik. Így az első oszlop a tölcséresre, második az automatikus és a tölcséres különbségére, és a harmadik az automatikus betöltésre vonatkozó eredményeket tartalmazza. A sorok esetén az első sor a mester tesztcellára, második a prototípus és a mester különbségére, és a harmadik a prototípus tesztcellára vonatkozó eredményeket tartalmazza. Az ábrákon az összes mérésre vonatkozó statisztikai adatok is láthatók, ahol az átlag és a szórás mértékegysége nedvességszázalék (%), a meredekség mértékegység-nélküli.



94. ábra Nedvességmérési hibák (a, c, g, i) és kereszt eltérések (b, d, e, f, h); a mérés módját körben a feliratok jelölik; kék pontok: szója minták

A 94. ábra (a) a mester/tölcsér nedvességmérési hibáját mutatja. Az eredményen látható, hogy az évjáratból eredő hatás 2006-ban -0,08% átlagos hibát okozott és a hibák szórása 0,3%. (A kalibráció a 1998-2003 között mért minták alapján történt.)

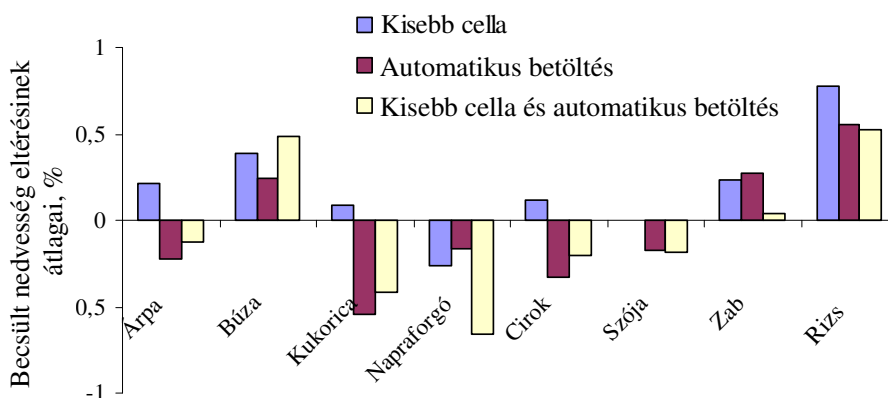
Vegyük először az automatikus betöltésre való áttérés hatását. A 94. ábra (c) a mester/automatikus nedvességmérési hibáját mutatja. Látható, hogy a hibák megnöttek különösen 20% nedvességtartalom felett. Ez az eredmény nem meglepő a betöltés hatásainak ismeretében. A hatást igazolja a 94. ábra (b) is, amely a mester/automatikus és a mester/tölcsér nedvességmérési eltéréseket mutatja. Látható, hogy a szója is (kék) és a többi gabona (zöld) is nagy eltéréseket mutat.

Másodszor tekintsük a más tesztcellára való áttérést. Ezt az előzőhöz hasonló módon, de a 94. ábra (d) és (g) panelén figyelhetjük meg. Az eredményből látszik, hogy más cellára való áttéréssel a hibák jelentősen megnöttek, igaz kisebb mértékben, mint automatikusra való áttérés esetén. Ez akkor is azt jelenti, hogy a kalibráció nem vihető át anélkül, hogy a nedvességmérés hibája ne változzon jelentősen. A szója (kék pontokkal), amit a sztenderdizációhoz használtunk természetesen nem mutat átlag-eltérési és merekségi trendet. Amennyiben a cella és a betöltés is változik (94. ábra e), látható, hogy a szórás még nagyobb.

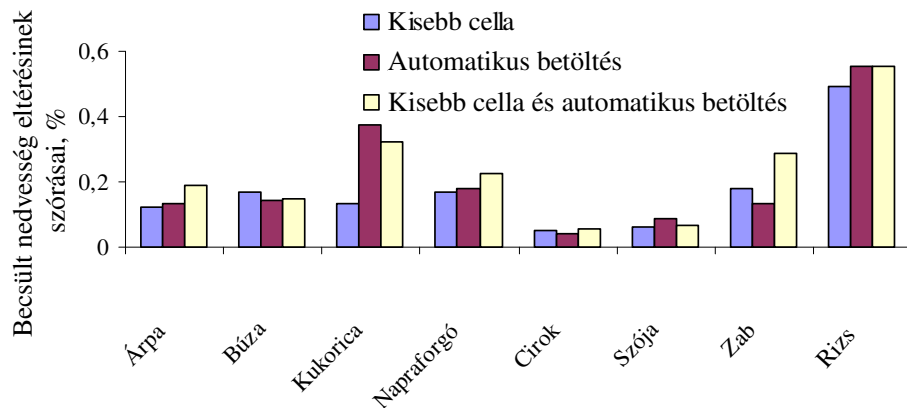
A 94. ábra (f) panelén viszont nagyon jó egyezés figyelhető meg a mester/automatikus és a proto/automatikus között. Ennek az lehet az oka, hogy az tölcéses betöltés hatására a szemek rendeződnek, automatikus esetben a szemek rendezetlenek. Amikor áttérünk egy másik cellára, akkor ez az elrendeződés a másik cellában valószínűleg másképp zajlik le, ezért más lesz a nedvességmérési eredmény. Míg automatikus betöltés esetén az "el nem rendeződés" nagyon hasonló, ezért nincs eltérés. Ez azt jelenti, hogy a kalibráció fejlesztéséhez rossz választás volt a tölcés, mert automatikus betöltéssel a kalibráció nagyobb sikerrel átvihető.

5.6.2 Kalibrációátvitel gabonafaj-függő korrekcióval

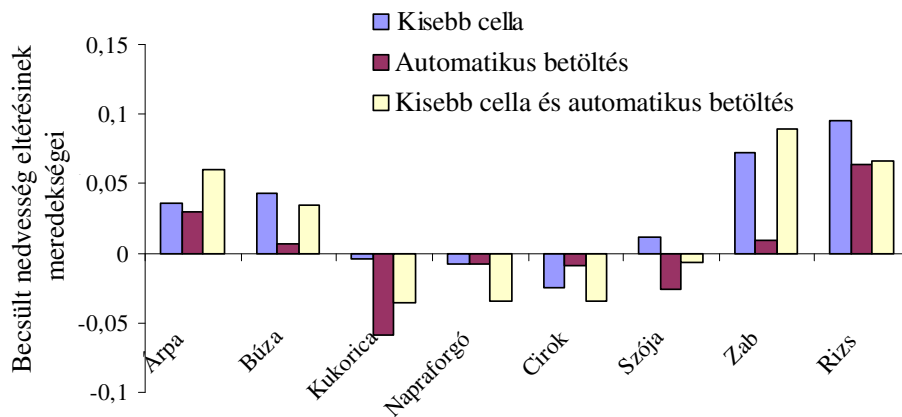
A 94. ábrán láttuk, hogy ugyanazon gabonaminták más tesztcellán mérve vagy más betöltést használva különböző nedvességmérési eredményt adnak. Ahhoz, hogy megfelelő korrekciót fejlesszünk szükséges, hogy az eltérések jellegét gabonafajonként ismerjük. Ennek érdekében a 94. ábrán is látható statisztikai adatok, amelyek a nedvességmérési eltérésekre vonatkoznak a következő ábrákon gabonafajonként láthatók (95. ábra - 97. ábra).



95. ábra Nedvességmérési eredmények eltéréseinek átlagos értékei a mester tesztcellán tölcéses betöltéssel mért értékekhez képest



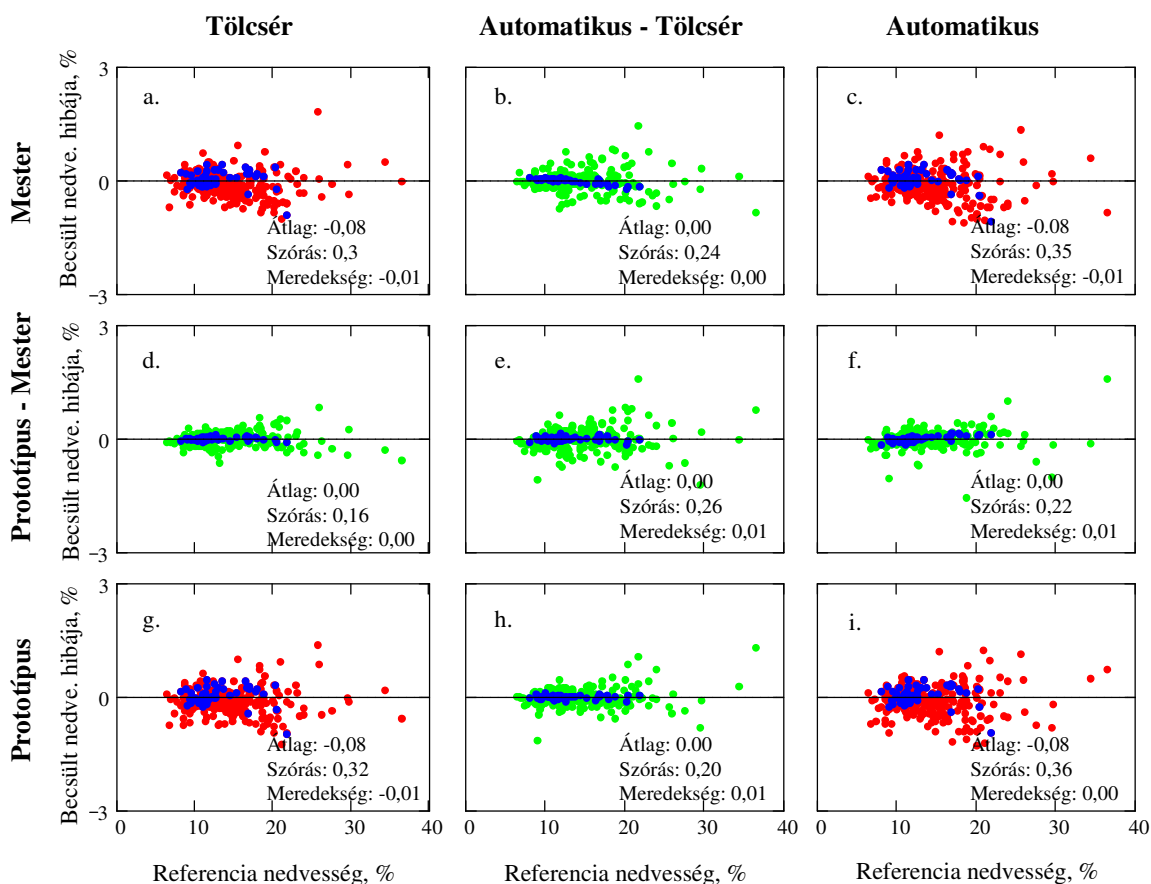
96. ábra A mester testcellán tölcseres betöltéssel mért nedvességértékekhez képesti eltérések szórásai



97. ábra Nedvességmérési eredmények eltéréseinek meredekségei a referencia nedvesség függvényében

Az eredményekből látható, hogy a gabonafajonkénti eltérések nagyon különbözők, ezért gabonafajonkénti nedvességfüggő korrekcióra van szükség.

A VHF-UGMA algoritmus több szintjén van lehetőség arra, hogy gabonafaj-függő kalibrációátviteli paramétereket vezessünk be. Az egyik lehetőség, hogy a sűrűségkorrekcióban a célsűrűséget optimalizáljuk, hogy az adott gabonafaj nedvességmérési eltérése minimális legyen (M17. melléklet). Ez azért különösen érdekes, mert csak egy paramétert változtattunk. Az optimális paramétereket a proto/tölcser, mester/automatikus és proto/automatikus átmenetre külön-külön határoztuk meg. A korrekció utáni eredményeket a 98. ábra mutatja.



98. ábra Nedvesség mérési hibák (a, c, g, i) és kereszt eltérések (b, d, e, f, h) térfogat-korrekcióval; a mérés módját körben a feliratok jelölik; kék pontok: szójaminták

A 98. ábrán látható, hogy a konfigurációk közti egyezés jelentősen javult. A nedvességmérési hibák a szórás alapján c, g és i esetben csak kicsit nagyobbak, mint a mester/tölsér, és a kölcsönös különbségek mindig kisebbek, mint a szárítószekrényhez képestiek. Hogy miért alkalmas a célsűrűség egyedül a nedvességfüggetlen (bias) és nedvességfüggő (slope) eltérést ilyen jól javítani, még nem határoztuk meg.

A másik korrekciós lehetőség, hogy lineáris korrekciót alkalmazunk, amelynek két paramétere van. Az egyik, és az általunk is választott lehetőség, hogy az egyesítő paraméterek közül a SP (meredekségi paraméter) és OP (y-irányú eltolás paramétere) paramétereket újra optimalizáljuk gabonafajonként. Az eredmény az M18. mellékletben látható. Ez is teljesen jó megoldás, és talán kézenfekvőbbnek tűnik, de ellentmond az eredeti filozófiának, hogy a nedvességmérési algoritmus cella független. Mivel a természet a gabonaorientációs hatás miatt nem tette lehetővé, hogy a kalibrációt át lehessen vinni korrekció nélkül, ezért ezen az elképzelésen változtatni kellett. A paramétereket optimalizációs eljárással határoztuk meg, ugyanúgy mint a gabonafaj-függő célsűrűség esetén (M17. melléklet). A korrekció utáni eredményeket a 12. táblázat mutatja.

12. táblázat Kalibrációátvitel lineáris gabonafaj-függő korrekciókkal

	Tölcsér	Automatikus-Tölcsér	Automatikus
Mester	Átlag: -0,08	Átlag: 0,00	Átlag: -0,08
	Szórás: 0,3	Szórás: 0,23	Szórás: 0,34
	Meredekség: -0,01	Meredekség: 0,00	Meredekség: -0,01
Proto-Mester	Átlag: 0,00	Átlag: 0,00	Átlag: 0,00
	Szórás: 0,15	Szórás: 0,24	Szórás: 0,21
	Meredekség: 0,00	Meredekség: 0,00	Meredekség: 0,00
Proto	Átlag: -0,08	Átlag: 0,00	Átlag: -0,08
	Szórás: 0,31	Szórás: 0,19	Szórás: 0,35
	Meredekség: -0,01	Meredekség: 0,00	Meredekség: -0,01

A 12. táblázat alapján látható, hogy csak némileg jobb a kalibrációátvitel sikeressége, mint a csak célsűrűség használata esetén.

5.6.3 A kalibrációátviteli-paraméterek meghatározásának lehetősége

Felmerült és sokat próbálkoztunk a fent említett paraméterek valamilyen fizikai, geometriai és kémiai paraméterekkel való becslésére. A következő táblázatban lévő paraméterekkel próbáltunk meg korrelációt találni.

13. Táblázat Fizikai és kémiai paraméterek az egyes gabonafajokhoz (Mészáros 2005a)

	Fehérje	Olaj	Hamu	Keményítő	Halmaz-	Szem-	Szem-	Szem-	Átmérő1	Átmérő2	Átmérő3	Formatényező
	%	%	%	%	sűrűség	tömeg	térfogat	sűrűség	mm	mm	mm	(88)
					g/cm³	mg	mm³	g/cm³				
Szója	40	22	4.9	24	0.73	157	125	1.25	7.3	6.5	5.5	0.2
Cirok	8.4	3	1.4	72	0.73	32	25	1.26	4.2	3.7	3.1	0.2
Naprafő	19	45	3.8	22	0.35	66	64	1.03	14.1	7.2	4.1	1.6
Kukorica	9.9	3	1.3	76	0.73	330	250	1.31	11.2	7.6	4.5	0.9
Zab	13	6	3.3	60	0.48	31	24	1.31	10.5	2.8	2.1	3.3
Búza	10	1.2	1.7	71	0.73	34	24	1.35	6.3	3.3	2.9	1.0
Árpa	16	3.2	2.5	70	0.62	42	35	1.2	8.6	3.1	2.4	2.2
Rizs	8.2	1.8	1.5	80	0.71	31	22	1.4	7.6	2.7	2.4	2.0

Számolásaink azt mutatták, hogy semelyik paraméterrel sincs jelentős korreláció. Többváltozós modelleket is fejlesztettünk, hogy becsüljük az előzőleg meghatározott optimális célsűrűséget a gabona kémiai és fizikai tulajdonságaiból. Az eljárás sikeres volt három változó esetén, és a keresztvalidáció is meggyőző volt, de végül ebben az irányban nem mélyültünk el, mert nem kaptunk egységes és magyarázható eredményeket, amelyek tudományosan és gyakorlati szempontból jelentőséggel bírnának.

5.7 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Konfigurációk

1. Visszanedvesített búzaminta sorozattal bizonyítottam, hogy a rövidzár üzemmód előnyös alternatívája az illesztett lezárással történő mérésnek, mert a nedvességtartalom változásának hatására közel azonos mértékben változik a komplex reflexiós tényező. A nedvességtartalomra való érzékenység nő a rövidzárlemez gabonatarató szakasztól vett távolságának növelésével, amit 10 cm-ig igazoltam. A 10 cm-es távolság esetén a reflexiós tényező nagyságának érzékenysége közel azonos, míg a fázis négyszer érzékenyebb, mint az illesztett esetben.

2. Bizonyítottam, hogy a 149 MHz-es mérőfrekvenciától csak kb. +/-30 MHz-el lehet eltérni, úgy hogy a dielektromos állandón elegendő legyen a lineáris transzformáció, és hogy az eredeti frekvencián történő méréssel adott hibahatáron belüli legyen a nedvességmérési eredmény. A permittivitás mérésének felső határa a transzverzális-elektromágneses módú modellezéssel kb. 300 MHz, elméleti felső korlátnak 1,5 GHz adódott.

3. Bizonyítottam, hogy csak a reflexiós tényező nagysága elegendő a gabona nedvességtartalmának mérésére a következő módon: A reflexiós tényező nagyságából 5-öd fokú polinom szükséges a dielektromos állandó becsléséhez. Az így kapott dielektromos állandóból az eredeti VHF-UGMA algoritmussal számolt nedvességmérési eredmény nem egyezett megfelelő mértékben az eredeti módszer által adott értékekkel. Viszont a VHF-UGMA nedvességmérési algoritmus paramétereinek újraoptimalizálásával a csak a reflexiós tényezőt alkalmazó mérési mód azonos RMSE értéket ad a komplex reflexiós tényezőn alapuló mérési móddal.

Modell

4. ABCD mátrix reprezentációt elsőként alkalmaztam sikeresen nagy méretű, nyitott tesztcellákra. Az általam felépített modellben figyelembe vehető a tesztcella mérete, karakterisztikus impedanciája és a záróimpedancia nagysága, amely lehetőséget teremt különböző méretű és mérési módban működő tesztcellák modellezésére, továbbá a tesztcella paramétereinek elméleti vizsgálattára optimalizálás céljából. A kalibráció során illesztő paraméterként az átmeneti szakasz impedanciáinak és az ürescella-korrekciónak optimalizálásával kis mértékben jobb egyezést kaptam, mint az eredetileg alkalmazott jelfolyamábrás modellel.

Sztenderdizáció

5. A közel nulla veszteségi tényezőjű anyagok alkalmasak lehetnek a tesztcellák sztenderdizációjára. Az általunk alkalmazott három szervesetlen anyaggal, 1, 89, 127 és 165 MHz-en mért komplex permittivitások használatával sztenderdizált cellával kapott nedvességmérési eredmények megfeleltek a National Institute of Standards and Technology által előírt értékeknek.

Betöltések hatása

6.a A vizsgált betöltések (tölcséres, kézi és automatikus) alkalmazásával a VHF-UGMA nedvességmérési eredmények nem mutattak gyakorlati szempontból jelentős szórásbeli eltérést. Az LLL sűrűségkorrekció csak a kézi betöltés esetén volt valamelyest hatékony, de a tölcséres és automatikus betöltés alkalmazása esetén a szórásokat több esetben szignifikánsan rontotta. Ennek az oka, hogy a nedvességmérés szórása nem csak a halmazsűrűség, hanem a gabonaszemek orientációjának mértékének és irányának változása miatt van.

6.b Bizonyítottam, hogy különböző betöltésekkel a nedvességmérési eredmények nagymértékben eltértek. A 20% nedvességtartalmú zabminta 3,5 %-os nedvességeltérést mutatott. A nedvességmérési eredmények eltérése, nem a sűrűségkülönbségből, hanem a gabonaszemek orientációjának különbségéből adódik. Az LLL sűrűségkorrekció és más sűrűségkorrekció sem lehet alkalmas a gyakorlatban arra, hogy az orientáció változásából eredő hibát kiküszöbölje, mivel az orientáció mértéke és iránya egy adott mérésnél a teljes térfogatra nem mérhető praktikus módon.

6.c Bizonyítottam, hogy a vizsgált betöltések közti nedvességmérési eredmények különbsége nedvességtartalom-függő. A szemek héja nem gyakorolt az eltérésre bizonyítható hatást. A dielektromos állandó eltérése nem frekvenciafüggő az 1-250 MHz-es frekvenciatartományban.

Térbeli orientáció

7. 2D Fourier transzformált képek analízisével bizonyítottam, hogy a különböző betöltések különböző térbeli orientációs tendenciákat eredményeznek.

- A tölcséres betöltéssel a gabonaszemek a cella hosszanti falával párhuzamos,
- kézi betöltéssel, ami oldalról történik, a gabonaszemek a cella hosszanti falára merőleges,
- automatikus betöltés esetén rendezetlen térbeli orientációs tendenciát mutatnak.

Kalibrációátvitel

8. Bizonyítottam, hogy a nedvességmérési kalibráció átvitele más geometriájú tesztcellára, vagy más betöltési módra - még nagyon jó hatékonyságú sztenderdizáció után - sem lehetséges gabonafaj-függő korrekciók nélkül. A (két paraméteres) lineáris gabonafaj-függő korrekció tökéletesen megfelelő a kalibrációátvitel megvalósítására. A korrekció egyetlen paraméterrel is lehetséges: a LLL sűrűségkorrekcióban célsűrűség fajonkénti megfelelő megválasztásával gyakorlati szempontból megfelelő hatékonyságú kalibrációátvitelt valósíthatunk meg.

6 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A mester tesztcella három elektródás elrendezése optimális. Nem adódott semmi ok, hogy ettől eltérő prototípus cellákat készítsünk. Az eredeti 149 MHz frekvenciától nem indokolt eltérni, de lehetséges körülbelül ± 30 MHz-cel, amihez szükséges egy lineáris korrekció, hogy az eredeti VHF-UGMA módszert alkalmazni lehessen.

Előnyösebb megoldásként mutatkozik a rövidzár üzemmód és a csak reflexiók tényező mérése. A gabonatarató szakasztól 15 cm-re lévő rövidzár lemezzel azonos mérési érzékenység érhető el, és egy ilyen felépítésű cella olcsóbb és mechanikailag stabilabb. Mivel a méréseket csak visszanedvesített gabonákkal végeztük el, szükséges a veszteségi tényező varianciájából eredő hibának a meghatározása és a cella paraméterek hatásának vizsgálata

A cellák ABCD mátrixokkal történő modellezése új perspektívát nyitott a tesztcella viselkedésének jobb megismerhetőségében, és a méretek és egyéb paraméterek optimalizálásában. További kutatásokkal, például impulzus-visszhang reflektometriás (TDR) vizsgálattal jobban megismerhető lenne a tesztcella viselkedése és még tökéletesebb modellt lehetne alkotni.

A vizsgált szervesen szilárd sztenderdizációs anyagok ígéretesnek mutatkoztak két tesztcella sztenderdizációjának hatékony elvégzéséhez, annak ellenére, hogy a veszteségi tényezőjük közel nulla. Az üveggolyók dielektromos állandója mutatott egy kicsi, 0,036-os eltérést a tölcésrés és az automatikus betöltéssel, ennek okát még vizsgálni kell. További anyagok felderítése és vizsgálata szükséges, hogy meghatározható legyen az optimális sztenderdizációs eljárás.

Kutatásaink feltárták, hogy a betöltések különböző mértékben és irányban orientálják a gabonákat. Az ebből eredő hiba egy 20 % nedvességtartalmú zabminta esetén akár 3,5 %-os nedvességeltérés is lehet, ami 17,5 %-os hiba. A nedvességmérés gyakorlatában ebből az következik, hogy a nem gömb alakú termények vagy más anyagok esetében az orientáció mértékének vagy irányának megváltozása jelentős hibát okozhat, például kézi betöltés esetén, ha a felhasználó a betöltés irányát változtatja. A korábbi kutatások során tapasztalt varianciák nem csak az eddig az irodalomban felsorolt tényezők miatt vannak, hanem a szemek orientációjának mértékének és irányának változása miatt is. Másrészt az irodalomban megadott granuláris anyagok permittivitása nem megbízható, ha nem adták meg a betöltés módját.

A kutatás fő kérdésére a válasz, hogy a mester tesztcellán fejlesztett kalibráció átvitele csak gabonafaj-függő korrekcióval lehetséges, amennyiben változik a gabonatarató szakasz geometriája vagy a betöltési mód. A kalibráció átvihetősége sokkal sikeresebb lehetne gabonafaj-független korrekciókkal, ha az eredeti kalibrációt automatikus betöltéssel végezték volna.

7 ÖSSZEFOGLALÁS

A gabona nedvességtartalma az egyik legfontosabb tényező a gabona árának meghatározásánál. A gabonanedvesség-mérés legnagyobb problémája, hogy a különböző típusú berendezések jelentősen eltérő eredményeket szolgáltatnak, nem egységesek, ami komoly problémát okoz a kereskedelemben. Ennek megoldására az Egyesült Államokban egy adott típusú berendezést szabványosítottak, amelynek van egy etalon példánya az Egyesült Államok Gabonafelügyeleténél (USDA-GIPSA), amelyhez a többi azonos típusú egységeket sztenderdizálják, és ezekkel lehet a hivatalos nedvességtartalmat meghatározni. Ennek a megoldásnak több hátránya van. Egyrészt nem oldja meg a mérések nemzetközi egységességét, másrészt a műszergyártók nem motiváltak a technika igen költséges továbbfejlesztésében. Ezért az USDA-GIPSA kifejlesztett egy új gabonanedvesség-mérési eljárást és kalibrációt, amely megbízhatóbb és pontosabb eredményt szolgáltat a jelenleg kapható nedvességmérő berendezéseknél. Ezt a módszert tervezik szabványosítani és elősegíteni a világméretű elterjedését. Ennek érdekében a fejlesztési eredményeket és a kalibrációt nem szabadalmaztatták, hanem mindenki számára hozzáférhetővé tették, így bármelyik műszergyártó - kis műszerfejlesztési költséggel és úgynevezett kalibrációátvitellel - saját kompatibilis berendezést tervezhet és forgalmazhat.

A kutatásunknak az volt a célja, hogy feltárjuk a kalibráció átvitelét befolyásoló tényezőket és módszert dolgozzunk ki különböző berendezések sztenderdizációjára. Ennek érdekében meghatároztuk a lehetséges tesztcella konstrukciók és mérési módszerek előnyeit és hátrányait. Továbbfejlesztettük a mérőcella matematikai modelljét, amivel a mért elektromos jellemzőből a nedvesség meghatározás alapjául szolgáló dielektromos állandót lehet számolni, ezzel lehetőség nyílt különböző tesztcellák egyszerű modellezése és a tesztcella paraméterek hatásainak a vizsgálatára. Méréseket végeztünk és matematikai algoritmusokat fejlesztettünk, hogy meghatározzuk a legalkalmasabb eljárást, amivel egy berendezés az etalon mérőműszerhez sztenderdizálható. Mérésekkel meghatároztuk három a gyakorlatban előforduló betöltési módszer hatását, mely során felismertük, hogy a különböző betöltésekkel jelentős nedvességmérési eltérés adódik, továbbá bizonyítottuk, hogy ennek oka a gabonaszemek különböző irányú és mértékű elrendeződése (orientációja). Végezetül 328 gabonamintán meghatároztuk 8 gabonafajra és 16 fajtára a cella méretének és a betöltési módszer változásának hatását.

A kutatási eredményeinkből arra a következtetésre jutottunk, hogy a kalibráció nem vihető át gabonafaj független paraméterek nélkül, ha a tesztcella mérete és a betöltés módja különböző, annak ellenére, hogy a dielektromos állandó mérésének sztenderdizációja megoldott. Ezért a cella méretének és a betöltési módszernek szabványosnak kell lennie.

7.1 SUMMARY

The grain moisture content is one of the most important factors determining the price of the grain. The most crucial problem is that the different equipment yield significantly diverse moisture results, so they are not uniform, and this causes problems in grain trade. In United States to solve this problem a grain moisture meter model was selected for official grain inspection standard. There is an etalon unit at United States Department of Agricultural - Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration (USDA-GIPSA) that is the basis for standardizing the same type of moisture meters using in the official grain inspection. There are more disadvantages of this solution. On hand it does not solve the international uniformity, on the other hand the manufacturers are not motivated to develop new methods due to its cost. Hence the USDA-GIPSA developed a new grain moisture algorithm and calibration, which provides more reliable and accurate results than the recent grain moisture meters in commercial use. This method is planned to be taken as official moisture measurement technology and to encourage the international spread. Accordingly, the results of the development and the calibration are not patented, but that is available for public, so any manufacturer can design and sell his own compatible equipment developed at low cost using calibration transfer.

The goal of our research was to reveal the affecting factors on calibration transfer and to develop methods standardizing different equipment. That is why we determined advantages and disadvantages of the possible test cell constructions and measurements methods. We improved the mathematical model of the test cell. The model is used to calculate the dielectric constant which is the basis for the moisture determination. So it became possible to simply model diverse test cells and investigate the effects of the test cell parameters. We made measurements and developed algorithms to determine the most advantageous method by that a commercial unit will be standardized to the master unit. We determined the effects of three most frequently used loading methods and we discovered that the different loading methods show significant moisture difference and we approved that the reason for this is the different degree and direction of the orientation tendency of the kernels in the test cell. Finally, we determined the effects of the changes of test cell size and the loading method. For this we used 328 samples representing 8 grain groups and 16 grain types.

The conclusion of the research was that the dielectric test cell standardization was successful. However the calibration was not transferable without grain group dependent parameters if the size of the test cell and the loading method changes so the size of the test cell and the loading method must be uniform.

MELLÉKLETEK

M1. IRODALOMJEGYZÉK

- Babb, J. C., C. J. Dempster, et al. (1989): *Prediction of the Moisture-Content of Eastern Canadian Corn Using Measurements of Capacitance and Test Weight*. Canadian Journal of Plant Science, 69(1) 109-119.
- Bartley, P. G., R. W. McClendon, et al. (1997): *Moisture determination with an artificial neural network from microwave measurements on wheat*. IMTC/97 - Ieee Instrumentation & Measurement Technology Conference: Sensing, Processing, Networking, Proceedings Vols 1 and 2 1238-1241.
- 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.
- Chew, W. C., K. J. Olp, et al. (1991): *Design and Calibration of a Large Broad-Band Dielectric Measurement Cell*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 29(1) 42-47.
- Debye, P. (1929): *Polar Molecules*. New York, Chemical Catalog Company
- 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.
- 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*. Kansas City, Missouri, University of Missouri-Kansas City. PhD: 168.
- Gillay, B. and D. B. Funk (2002): *Efficacy of the Landau-Lifshitz, Looyenga Mixture Equation for Density-Correcting Dielectric Measurements of Yellow-Dent Corn Subjected to Vibration and Pressure*. ASAE Annual Meeting, Chicago. Paper No.: 026038.

- Gillay, B. and D. B. Funk (2006): *Effects of moisture distribution on measurement of moisture content of dried corn*. Acta Alimentaria, 35(2) 171-181.
- Gorriti, A. G. and C. E. Slob (2005): *A new tool for accurate S-parameters measurements and permittivity reconstruction*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(8) 1727-1735.
- Hasted, J. B. (1973a): *The Water Molecule and Dielectric Theory*. Aqueous Dielectrics. London, Chapman and Hall: 302.
- Hasted, J. B. (1973b): *Dielectric Properties of Absorbed Water*. Aqueous Dielectrics. London, Chapman and Hall: 234-255.
- Hasted, J. B. (1973c): *The Dielectric Properties of Heterogeneous Substances*. Aqueous Dielectrics. London, Chapman and Hall: 117-135.
- Hemeda, M. A., C. R. Hurburgh, et al. (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*. Institute of Agricultural and Environmental Engineering. Wageningen, The Netherlands, Wageningen Agricultural University: 141.
- Hlynka, I. and W. Bushuk (1959): *The weight per bushel*. Cereal Science Today, 4 239-240.
- Huang, Y. (2001): *Design, calibration and data interpretation for a one-port large coaxial dielectric measurement cell*. Measurement Science & Technology, 12 111-115.
- Hunt, W. H. and M. H. Neustadt (1966): *Factors Affecting the Precision of Moisture Measurement in Grain and Related Crops*. Journal of the A.O.A.C, 49(4) 757-763.
- Hunt, W. H. and S. W. Pixton (1972): *Moisture--Its Significance, Behavior, and Measurement. Storage of Cereal Grains and Their Products*. C. M. Christenson. Minneapolis, Minn., American Association of Cereal Chemists: 1-55.
- Hurburgh, C. R. (1987a): *Moisture Meter Performance .2. Soybeans*. Transactions of the Asae, 30(2) 582-584.
- Hurburgh, C. R., C. J. Bern, et al. (1981): *Improvements in the accuracy of corn moisture measurement in Iowa*. ASAE Paper(81-3515) 54 pp.
- Hurburgh, C. R., L. N. Paynter, et al. (1987b): *Moisture Meter Performance .1. Corn over 5 Crop Years*. Transactions of the Asae, 30(2) 579-581.
- Hurburgh, C. R., L. N. Paynter, et al. (1986): *Performance of Farm-Type Moisture Meters*. Transactions of the Asae, 29(4) 1118-1123.

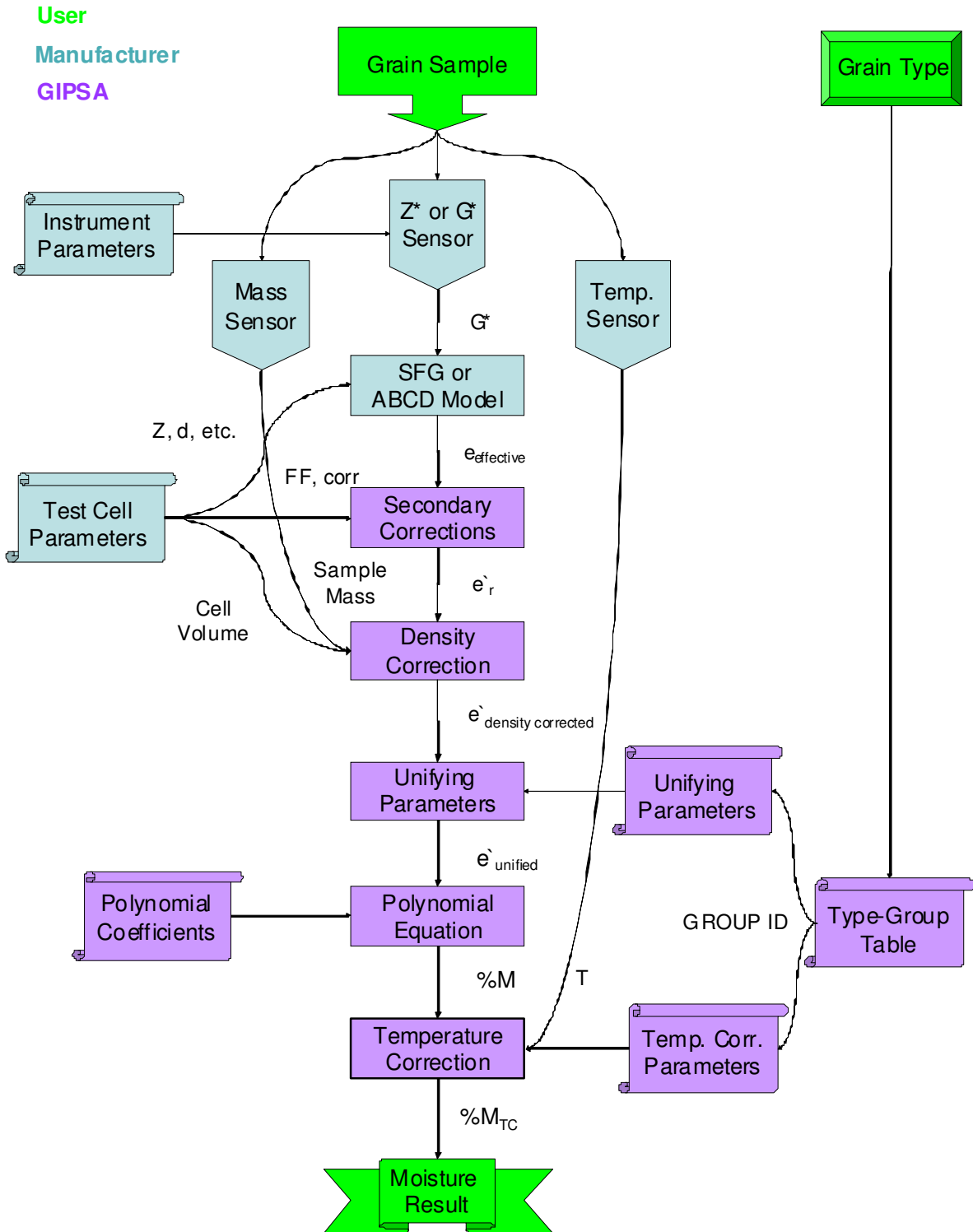
- ICC (1976): ICC - Standard Nr. 109/1 Determination of the Moisture Content of Cereals and Cereal Products (Basic Reference Method). J. L. Multon. Vienna, Austria, International Association for Cereal Chemistry.
- International Organization of Legal Metrology (1984): International Recommendation No. 59: Moisture Meters for Cereal Grains and Oilseeds. Paris, France, International Bureau of Legal Metrology.
- ISO (1978): International Standard ISO 760--Determination of Water -- Karl Fischer Method (General Method). Geneva, Switzerland, International Standards Organization.
- Jones, R. N. (1978): Electrical Characteristics of Corn, Wheat, and Soya in the 1-200 MHz Range. Boulder, Colorado, National Bureau of Standards.
- Jones, S. B. and S. P. Friedman (2000): *Particle shape effects on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles*. Water Resources Research, 36(10) 2821-2833.
- Jorgensen, J. L., A. R. Edison, et al. (1970): *A Bridge Method for Dielectric Measurements of Grain and Seed in the 50- to 250- MHz Range*. Transactions of the ASAE, 13(1) 18-20, 24.
- Karckainen, K. K., A. H. Sihvola, et al. (2000): *Effective permittivity of mixtures: numerical validation by the FDTD method*. Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 38(3) 1303-1308.
- Kirkby, D. (1996): *Finding the Characteristics of Arbitrary Transmission Lines*. Amateur Radio Journal, QEX, 3-10.
- Kirkby, D. (2004): Arbitrary Transmission Line Calculation, <http://atlc.sourceforge.net>.
- Kraszewski, A., Ed. (1996a): Microwave Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials. TAB-IEEE Press Book Series. New York, IEEE Press.
- Kraszewski, A. W. (1996b): Microwave Aquametry: Introduction to the Workshop. Microwave Aquametry--Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials. A. W. Kraszewski. New York, IEEE Press: 3-34.
- Kraszewski, A. W., S. Trabelsi, et al. (1998): *Comparison of density-independent expressions for moisture content determination in wheat at microwave frequencies*. Journal of Agricultural Engineering Research, 71(3) 227-237.
- Kraus, A. (1960): *Reflection Coefficient Curves of Compensated Discontinuities on Coaxial Lines and the Determination of the Optimum Dimensions*. Jurnal Brit.Inst.Radio.Eng. 137-152.
- 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.
- Kuhn, N. (1963): *Simplified signal flow graph analysis*. Microwawe Journal, 6(11) 59-66.

- Landau, L. D. and E. M. Lifshitz (1960): *Electrodynamics of Continuous Media*. Oxford, England, Pergamon Press.45-47
- LaVerne, E. and S. O. Nelson (1970): *A methode for determining dielectric properties of grain and seed in the 200- to 500-MHz range*. Transactions of the ASAE, 13(4) 491-495.
- Lawrence, K. C., D. B. Funk, et al. (1999): *Parallel-plate moisture sensor for yellow-dent field corn*. Transactions of the Asae, 42(5) 1353-1357.
- Lawrence, K. C. and S. O. Nelson (1993): *Radiofrequency Density-Independent Moisture Determination in Wheat*. Transactions of the Asae, 36(2) 477-483.
- Lawrence, K. C. and S. O. Nelson (1998a): *Sensing Moisture Content of Cereal Grains with Radio-Frequency Measurements -- A Review*. Third International Symposium on Humidity & Moisture, London, England, National Physical Laboratory.
- Lawrence, K. C., S. O. Nelson, et al. (1998b): *Flow-Through Coaxial Sample Holder Design for Dielectric Properties Measurements from 1 to 350 MHz*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 47(2) 354-361.
- Lawrence, K. C., S. O. Nelson, et al. (1989): *Automatic System for Dielectric-Properties Measurements from 100 Khz to 1 Ghz*. Transactions of the Asae, 32(1) 304-308.
- Lawrence, K. C., S. O. Nelson, et al. (1990): *Temperature-Dependence of the Dielectric-Properties of Wheat*. Transactions of the Asae, 33(2) 535-540.
- Lawrence, K. C., W. R. Windham, et al. (1998c): *Wheat moisture determination by 1- to 110-MHz swept-frequency admittance measurements*. Transactions of the Asae, 41(1) 135-142.
- Looyenga, H. (1965): *Dielectric Constants of Heterogeneous Mixtures*. Physica, 31 401-406.
- Matthews, J. (1963): *The Design of an Electrical Capacitance-Type Moisture Meter for Agricultural Use*. J. Agric. Engng. Res., 8(1) 17-30.
- Meeker, D. (2005): FEMM, <http://femm.foster-miller.net/>.
- Mészáros P., Funk D. B. (2003): *Moisture Limits for Measurement of Moisture in Cereal Grains and Oilseeds Below Zero Degrees Celsius by the Dielectric Method*. *ASAE Annual International Meeting*, Las Vegas, Nevada.
- Mészáros, P., Funk D. B. (2005a): *Unifying Parameters for a VHF Unified Grain Moisture Algorithm*, *ASAE Paper*, No. 053132, St. Joseph, Mich.
- Mészáros P., Funk D. B. (2005b): *Temperature Corrections for a very high frequency unified grain moisture algorithm*. *ISEMA*, Weimar, Germany.
- Mészáros, P. (2007): *Relationship between electrical parameters and physical properties of cereal grains, oilseeds and apples*. Budapest, Budapesti Corvinus Egyetem. Ph.D.

- Mongia, R. (1999): RF and Microwave Coupled-Line Circuits. London, Artech House
- MSZ6367/3-83 (1983): Élelmezési, takarmányozási ipari magvak és hántolt termények vizsgálata, Nedvességtartalom meghatározása: 9.
- Multon, J. L. (1990): Basics of Moisture Measurement in Grain. Uniformity by 2000--Highlights of an International Workshop on Maize and Soybean Quality. L. D. Hill. Champaign, Ill., Scherer Communications: 69-91.
- Nelson, S. O. (1981): *Review of Factors Influencing the Dielectric Properties of Cereal Grains.* Cereal Chemistry, 58(6) 487-491.
- 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. (2005): *Density-permittivity relationships for powdered and granular materials.* Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement, 54(5) 2033-2040.
- Nelson, S. O., A. W. Kraszewski, et al. (2000): *Using Cereal Grain Permittivity for Sensing Moisture Content.* IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 49(3) 470-475.
- Nelson, S. O., L. H. Soderholm, et al. (1953): *Determining the Dielectric Properties of Grain.* Agricultural Engineering(September) 608-610.
- Nelson, S. O. and L. E. Stetson (1976): *Frequency and Moisture Dependence of the Dielectric Properties of Hard Red Winter Wheat.* J. Agric. Engng. Res., 21 181-192.
- NIST (1996): NIST Handbook 44--Specifications, Tolerances, and Other Technical Requirements for Weighing and Measuring Devices. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office
- Nyfors, E. and P. Vainikainen (1989): Industrial Microwave Sensors. Norwood, MA, Artech House
- Pozar, D. M. (1998a): Microwave Network Analysis. Microwave Engineering. C. Robey. New York, John Wiley & Sons, Inc
- Sembery, P. (2002): Mezőgazdasági termények dielektromos jellemzői. Budapest, Akadémiai Kiadó
- Sembery, P., G. Gécz, et al. (1999): *High frequency and microwave dielectric properties of basic food material.* Hungarian Agricultural Engineering, Gödöllő(12) 15-19.

- Sembery, P., G. Géczi, et al. (2001): *Measurement Methods of Dielectric Properties of Mustard Seeds at Microwave Frequency*. Hungarian Agricultural Research, 10(3) 16-18.
- Sihvola, A. H. and J. A. Kong (1988): *Effective permittivity of Dielectric Mixtures*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 26(4), 420-429.
- Simonyi, K. (1990): *Elméleti villamosságtan*. Budapest, Tankönyvkiadó. 721
- Stratton, J. A. (1941): *Electromagnetic theory*. New York, McGraw-Hill.
- Tinga, W. R. and W. A. G. Voss (1973a): *Generalized approach to multiphase dielectric mixture theory*. Journal of Applied Physics, 44(9) 3897-3902.
- Tinga, W. R. and S. O. Nelson (1973b): *Dielectric Properties of Materials for Microwave Processing--Tabulated*. Journal of Microwave Power, 8(1) 23-65.
- 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 (2007a): *Influence of nonequilibrated water on microwave dielectric properties of wheat and related errors in moisture sensing*. Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement, 56(1) 194-198.
- Trabelsi, S. and S. O. Nelson (2007b): *Unified microwave moisture sensing technique for grain and seed*. Measurement Science & Technology, 18(4) 997-1003.
- USDA (1996) *Agricultural Fact Book 1996*. U. S. Department of Agriculture, Washington D. C.
- van Beek L. K. H. (1965): *Progress in Dielectrics*, 7.
- von Hippel, A. (1954): *Dielectric Materials and Applications*. New York
- von Hippel, A. (1995a): *Complex Permittivity and Permeability*. Dielectrics and Waves. Boston, Artech House.
- von Hippel, A. (1995b): *Interfacial and Space-Charge Polarization*. Dielectrics and Waves. Boston, Artech House. 1: 228-234.
- Waterloo, C. (1980): *How Farmers Lost Millions*. Des Moines Sunday Register. Des Moines, Iowa: 8A.
- Wilhelm, L. R., D. A. Suter, et al. (2004): *Drying and dehydration*. Food&Process Engineering Technology. St. Joseph, Michigan: 259-284 p.

M2. A VHF-UGMA FOLYAMATÁBRÁJA



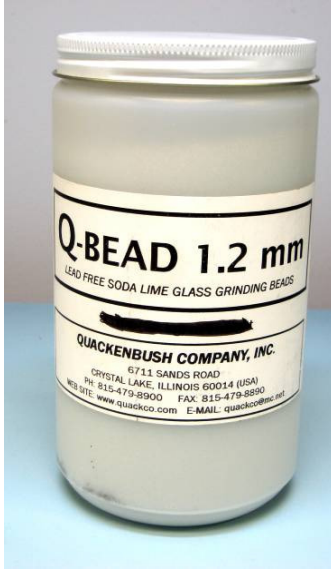
M3. HÁLÓZATSZÁMÍTÁSI PARAMÉTEREK KONVERZIÓS TÁBLÁZATA

	S	Z	Y	$ABCD$
S_{11}	S_{11}	$\frac{(Z_{11} - Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{\Delta Z}$	$\frac{(Y_0 - Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{\Delta Y}$	$\frac{A + B/Z_0 - CZ_0 - D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$
S_{12}	S_{12}	$\frac{2Z_{12}Z_0}{\Delta Z}$	$\frac{-2Y_{12}Y_0}{\Delta Y}$	$\frac{2(AD - BC)}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$
S_{21}	S_{21}	$\frac{2Z_{21}Z_0}{\Delta Z}$	$\frac{-2Y_{21}Y_0}{\Delta Y}$	$\frac{2}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$
S_{22}	S_{22}	$\frac{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} - Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{\Delta Z}$	$\frac{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 - Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{\Delta Y}$	$\frac{-A + B/Z_0 - CZ_0 + D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$
Z_{11}	$Z_0 \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}$	Z_{11}	$\frac{Y_{22}}{ Y }$	$\frac{A}{C}$
Z_{12}	$Z_0 \frac{2S_{12}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}$	Z_{12}	$\frac{-Y_{12}}{ Y }$	$\frac{AD - BC}{C}$
Z_{21}	$Z_0 \frac{2S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}$	Z_{21}	$\frac{-Y_{21}}{ Y }$	$\frac{1}{C}$
Z_{22}	$Z_0 \frac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}$	Z_{22}	$\frac{Y_{11}}{ Y }$	D
Y_{11}	$Y_0 \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}$	$\frac{Z_{22}}{ Z }$	Y_{11}	$\frac{D}{B}$
Y_{12}	$Y_0 \frac{-2S_{12}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}$	$\frac{-Z_{12}}{ Z }$	Y_{12}	$\frac{BC - AD}{B}$
Y_{21}	$Y_0 \frac{-2S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}$	$\frac{-Z_{21}}{ Z }$	Y_{21}	$\frac{-1}{B}$
Y_{22}	$Y_0 \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}$	$\frac{Z_{11}}{ Z }$	Y_{22}	$\frac{A}{B}$
A	$\frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{Z_{11}}{Z_{21}}$	$\frac{-Y_{22}}{Y_{21}}$	A
B	$Z_0 \frac{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{ Z }{Z_{21}}$	$\frac{-1}{Y_{21}}$	B
C	$Z_0 \frac{1 - (1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{1}{Z_{21}}$	$\frac{- Y }{Y_{21}}$	C
D	$\frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{Z_{21}}{Z_{21}}$	$\frac{Y_{21}}{Y_{21}}$	D

$$|Z| = Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}; \quad |Y| = Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21}; \quad \Delta Y = (Y_{11} + Y_0)(Y_{22} + Y_0) - Y_{12}Y_{21}; \quad \Delta Z = (Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}; \quad Y_0 = 1/Z_0$$

M4. SZTENDERDIZÁCIÓS ANYAGOK

Üveggolyók



Soft Air (Amo)



Műanyag szemcsék



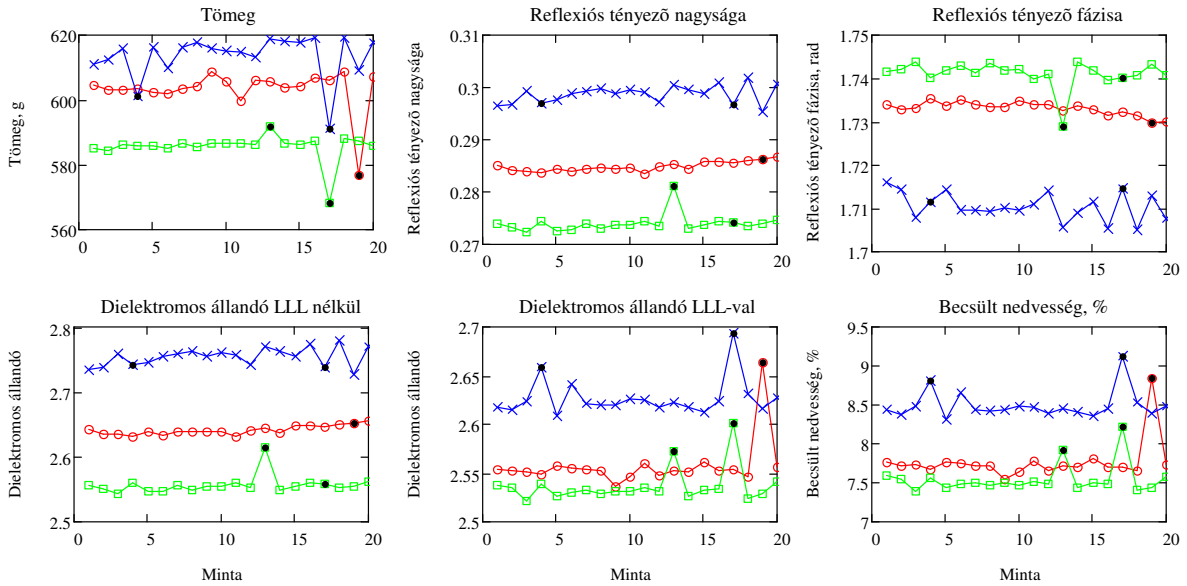
M5. SZTENDERDIZÁCIÓS CÉLFÜGGVÉNYEK

$$\begin{array}{l}
 \text{Goal(Pg,P)} := \\
 \left. \begin{array}{l}
 n \leftarrow 0 \\
 P_{15} \leftarrow P_{g0} \\
 P_{16} \leftarrow P_{g1} \\
 P_{17} \leftarrow P_{g2} \\
 P_{20} \leftarrow P_{g3} \\
 \text{for } i \in 0.. \text{rows}(E1) - 1 \\
 \quad \left[\begin{array}{l}
 s \leftarrow \text{Group}(E1_{i,0}) \\
 E1d \leftarrow E1_{i,6} + 1i \cdot \text{Im}(E1_{i,5}) \\
 T1 \leftarrow E1_{i,4} \\
 T2 \leftarrow \Gamma_{i,4}^2 \\
 E1dt \leftarrow E1d - \frac{\text{KTC}_{s,1}}{6} \cdot (T1 - 25) \\
 E2dt \leftarrow E1dt \\
 E2d \leftarrow E2dt + \frac{\text{KTC}_{s,1}}{6} \cdot (T2 - 25) \\
 W2 \leftarrow \Gamma_{i,3}^2 \\
 E2 \leftarrow \left[\left(\frac{1}{E2d^3} - 1 \right) \cdot \frac{W2}{\rho_{\text{grain}} \cdot P_{21}} + 1 \right]^3 \\
 \text{out}_n \leftarrow \text{ABCD}(E2, f, P, 50) \\
 n \leftarrow n + 1
 \end{array} \right. \\
 \left. \sum \left| \left(\text{out} - \Gamma_2^{(5)} \right)^2 \right|
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

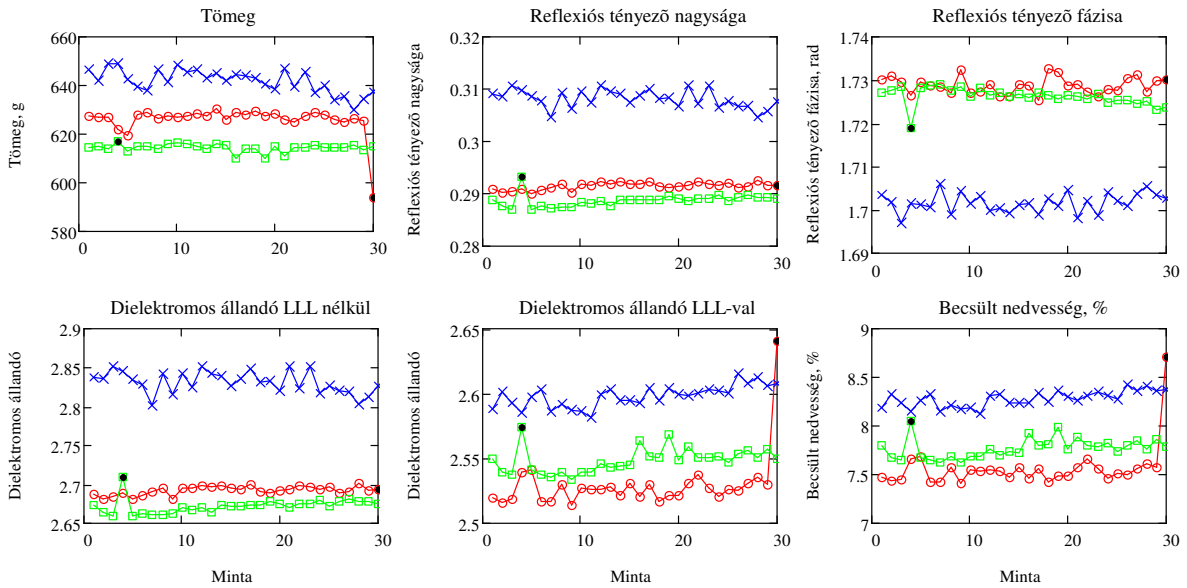
$$\begin{array}{l}
 \text{Goal2(Pg)} := \\
 \left. \begin{array}{l}
 E \leftarrow E2n \\
 EF \leftarrow \frac{E^{(5)} - 1}{Pn_{19}} + 1 + Pn_{20} \\
 Eg \leftarrow (EF - 1 - Pg) \cdot Pn_{19} + 1 \\
 E^{(5)} \leftarrow Eg \\
 Ed \leftarrow \text{DC}_{\text{Grain}}(E, Pn) \\
 M2 \leftarrow \text{MPred}(Ed) \\
 \sum \left(M2^{(10)} - M1^{(10)} \right)^2
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

M6. BETÖLTÉS HATÁSVIZSGÁLATÁNAK EREDMÉNYEI

Gabona = "Árpa" Nedvesség = "Szárász"

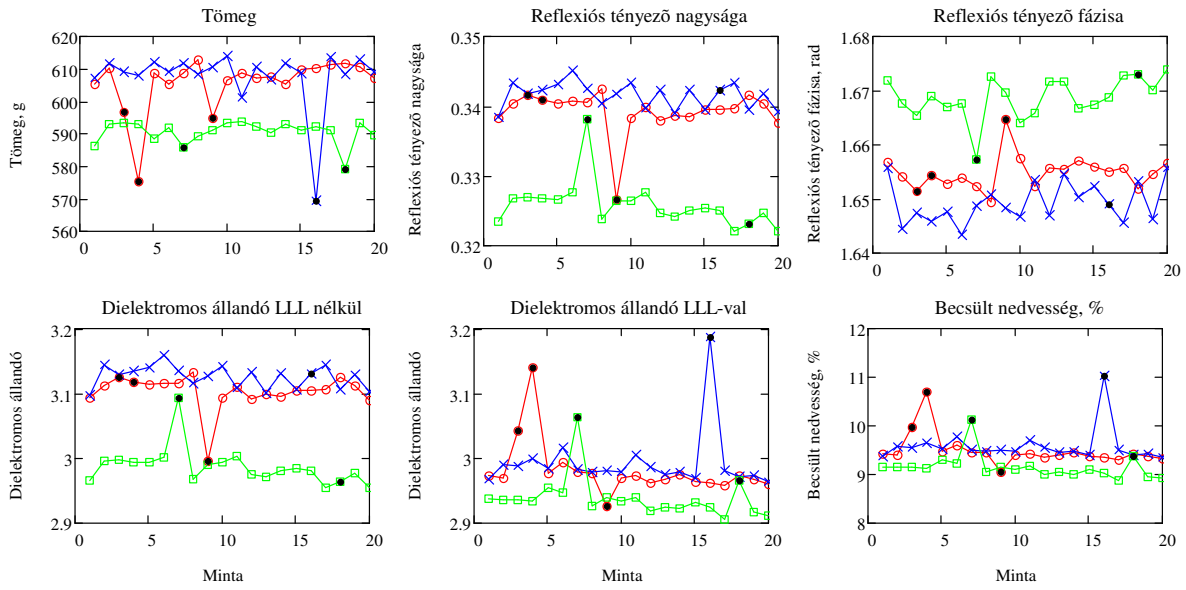


Gabona = "Búza" Nedvesség = "Szárász"

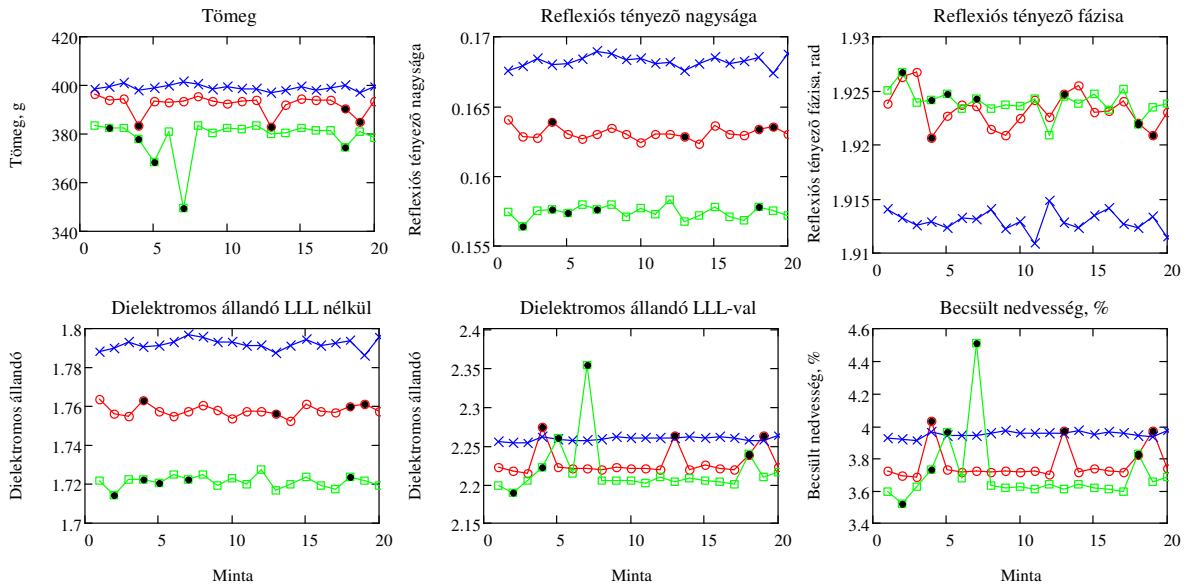


- ○ ○ Tölséres
- × × × Kézi
- □ □ Automatikus
- ● ● Kiugró

Gabona = "Kukorica" Nedvesség = "Szárász"

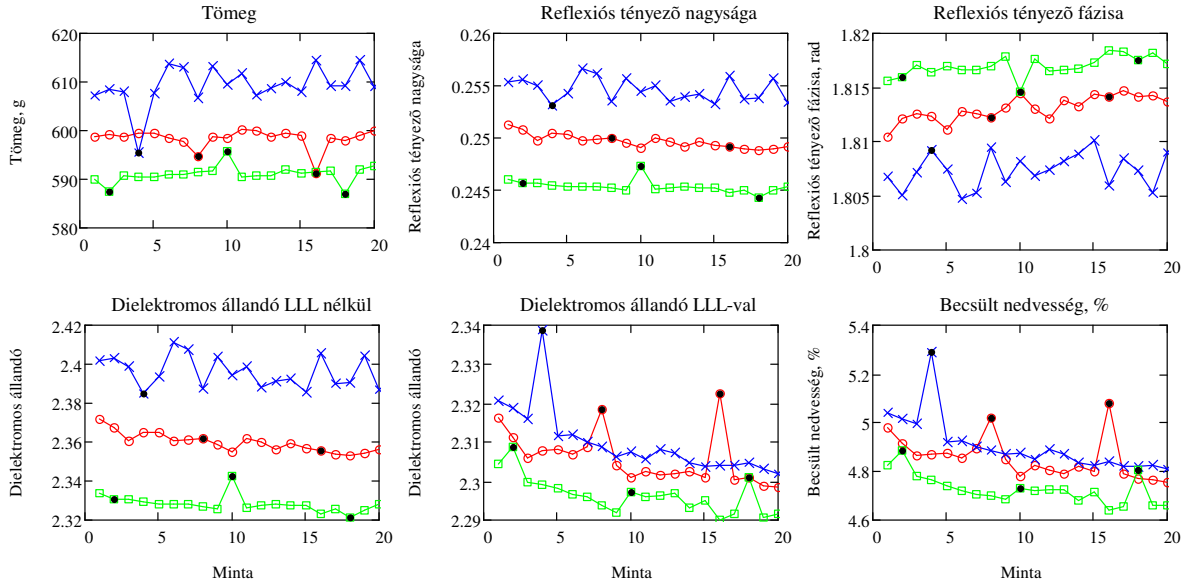


Gabona = "Napraforgó" Nedvesség = "Szárász"

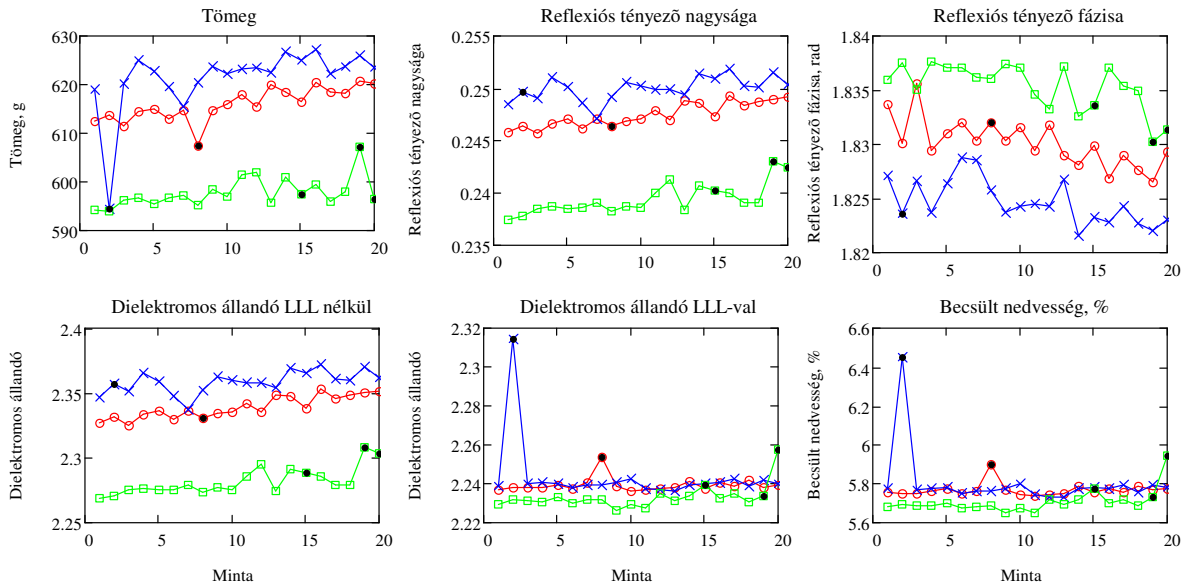


- Töléses
- × Kézi
- Automatikus
- Kiugró

Gabona = "Repce" Nedvesség = "Szárás"

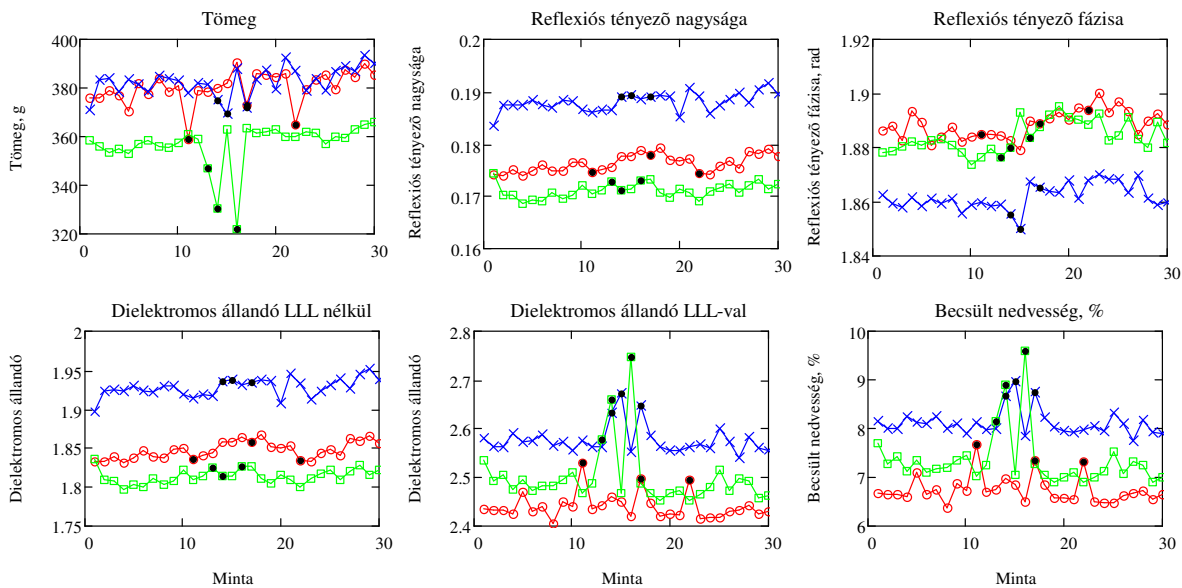


Gabona = "Szója" Nedvesség = "Szárás"

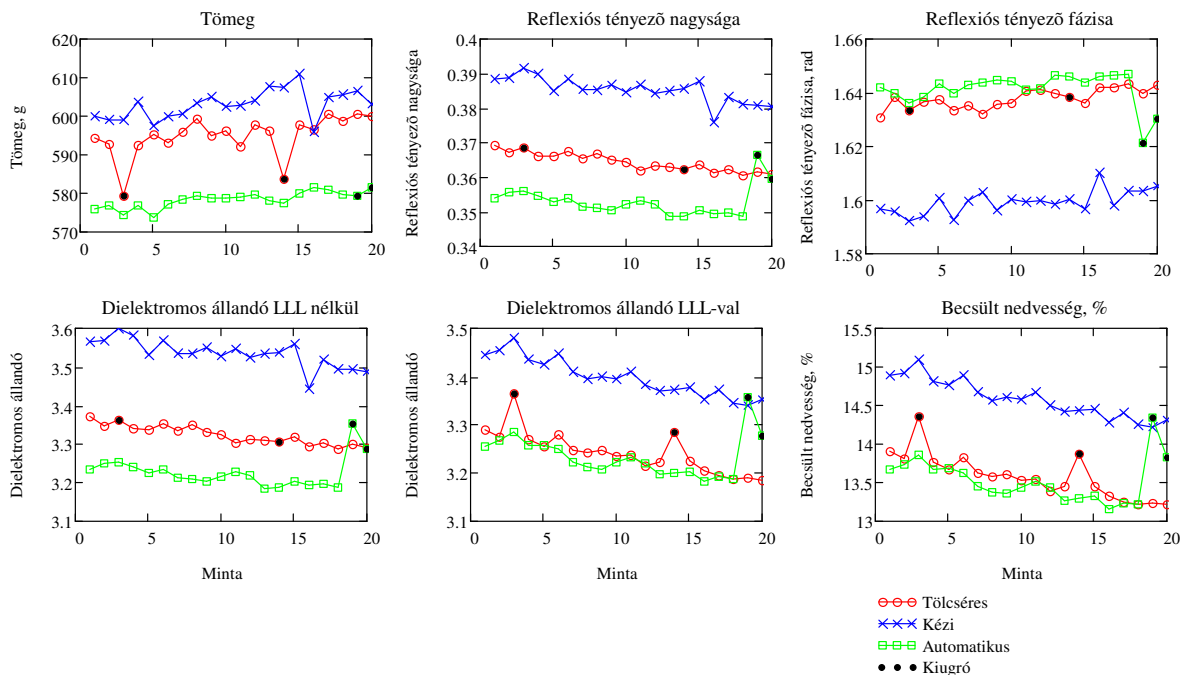


- Tölésérés
- × Kézi
- Automatikus
- Kiugró

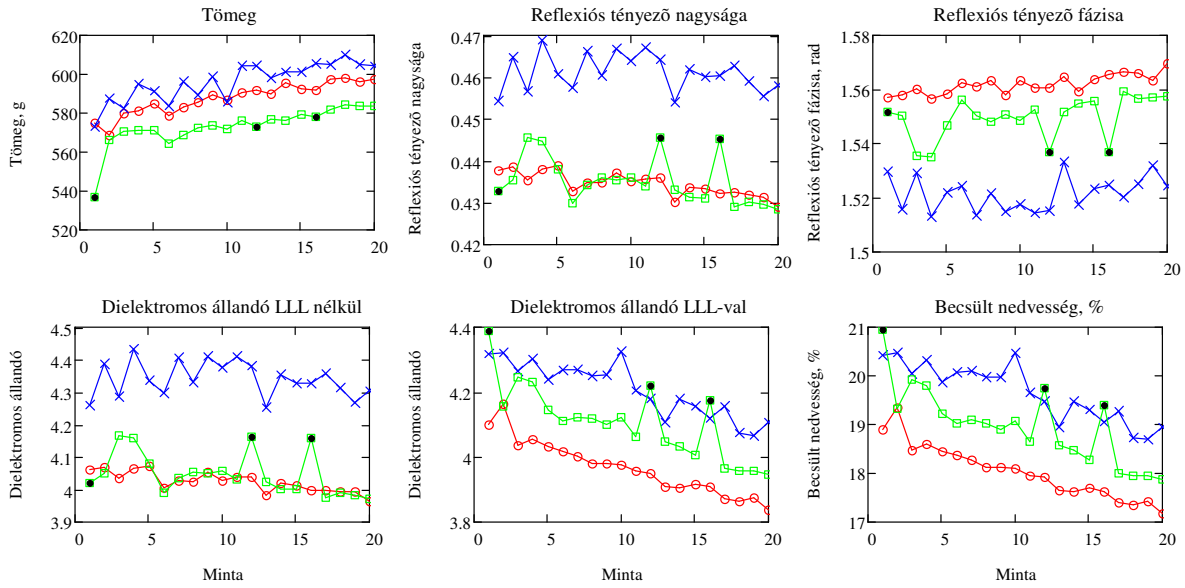
Gabona = "Zab" Nedvesség = "Szárás"



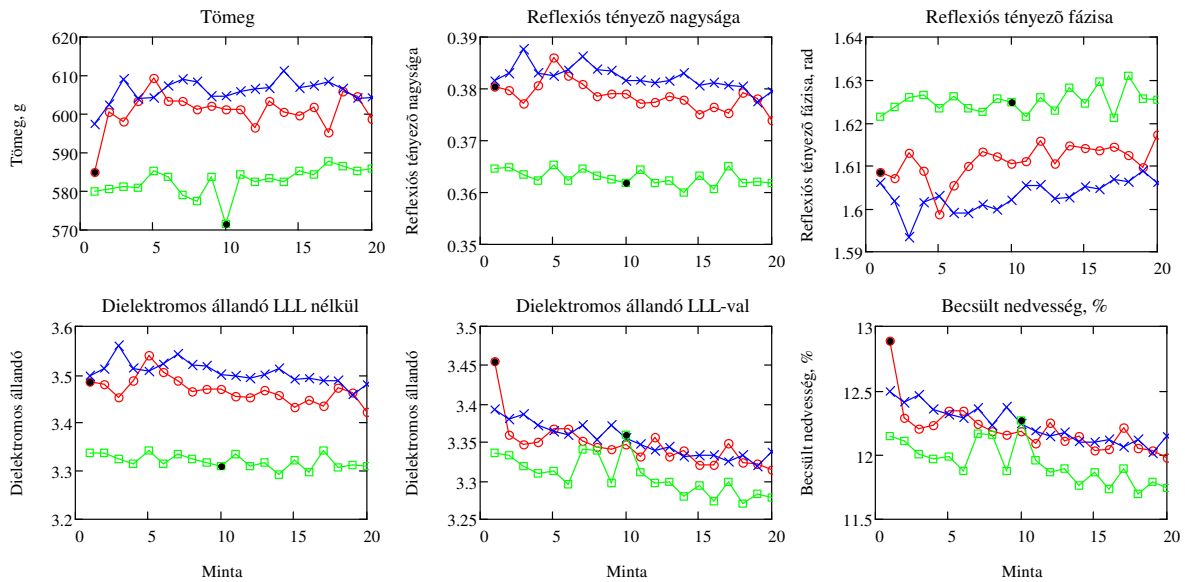
Gabona = "Árpa" Nedvesség = "Nedves"



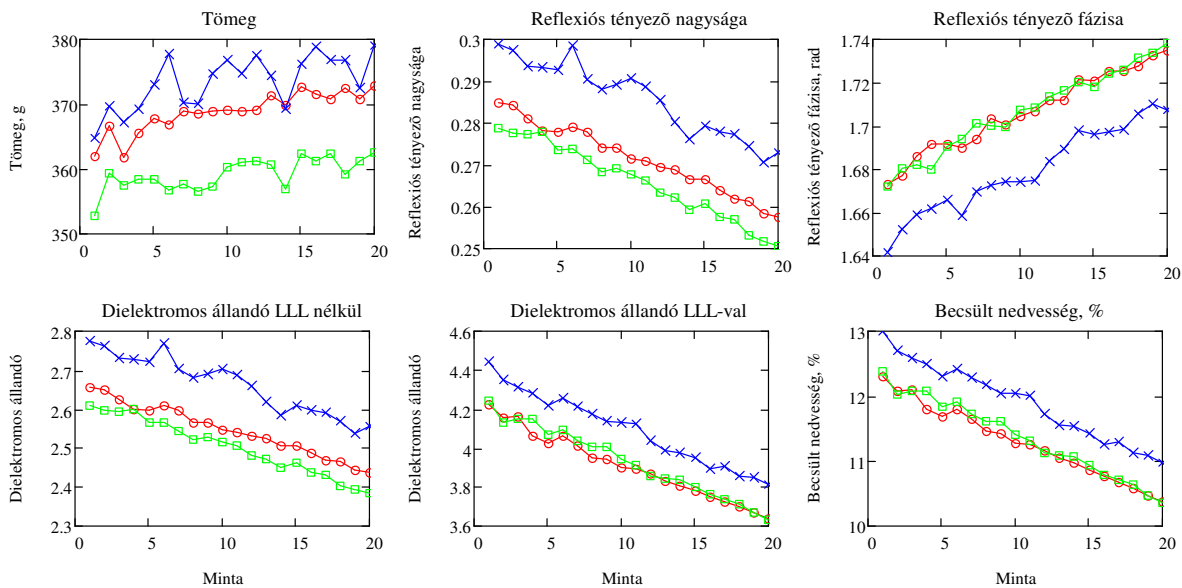
Gabona = "Búza" Nedvesség = "Nedves"



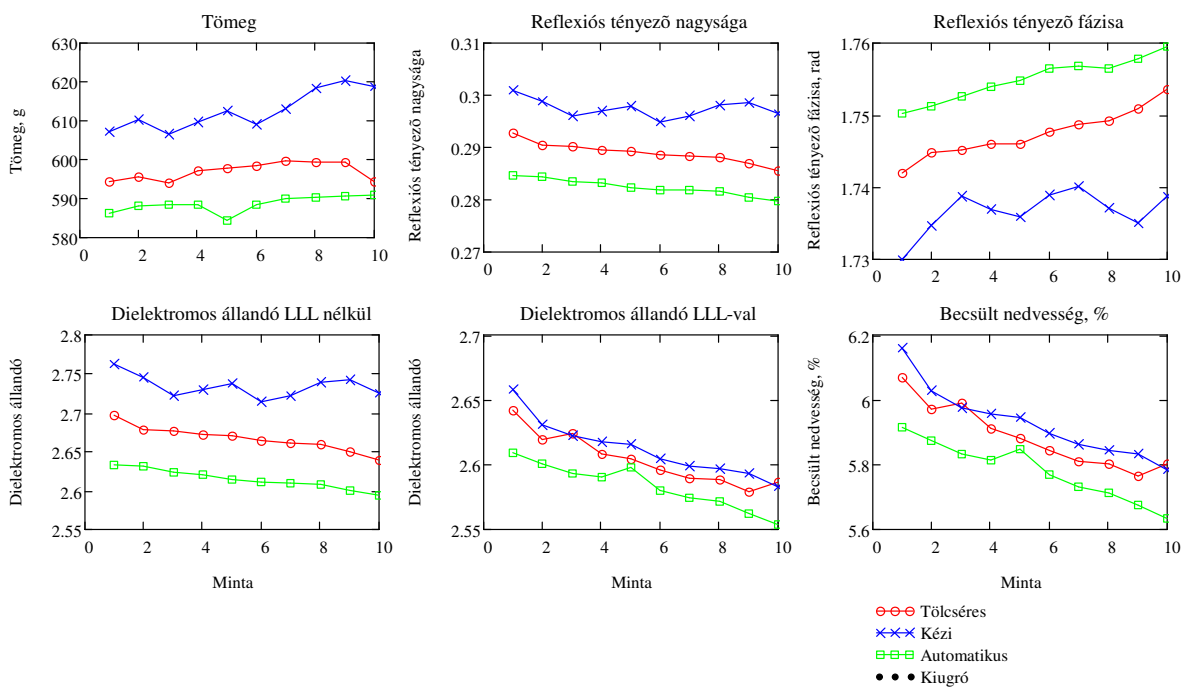
Gabona = "Kukorica" Nedvesség = "Nedves"



Gabona = "Napraforgó" Nedvesség = "Nedves"

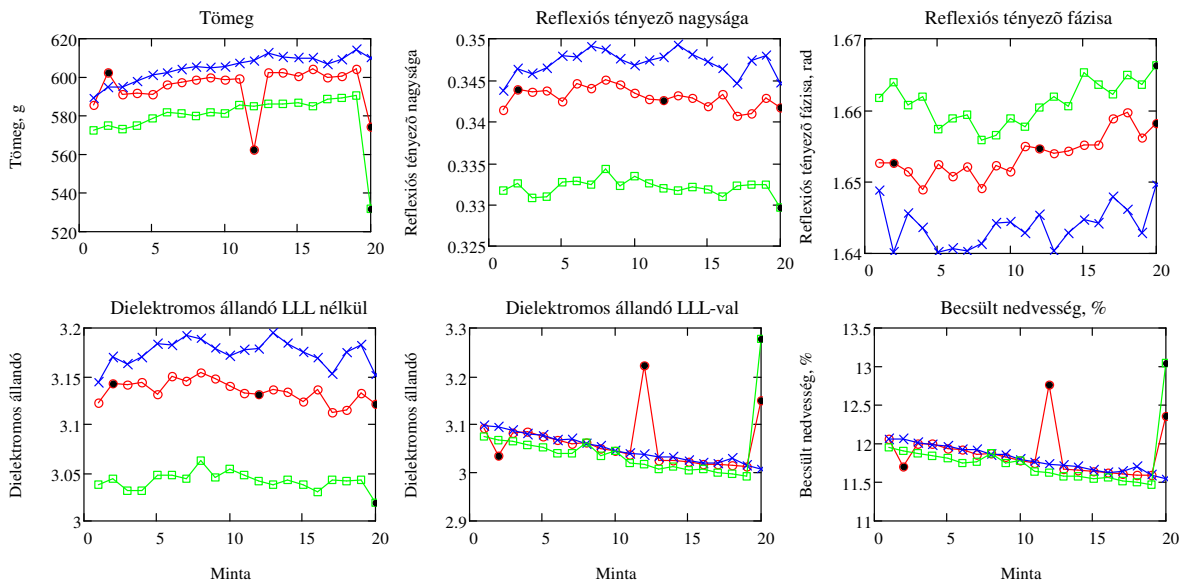


Gabona = "Repce" Nedvesség = "Nedves"

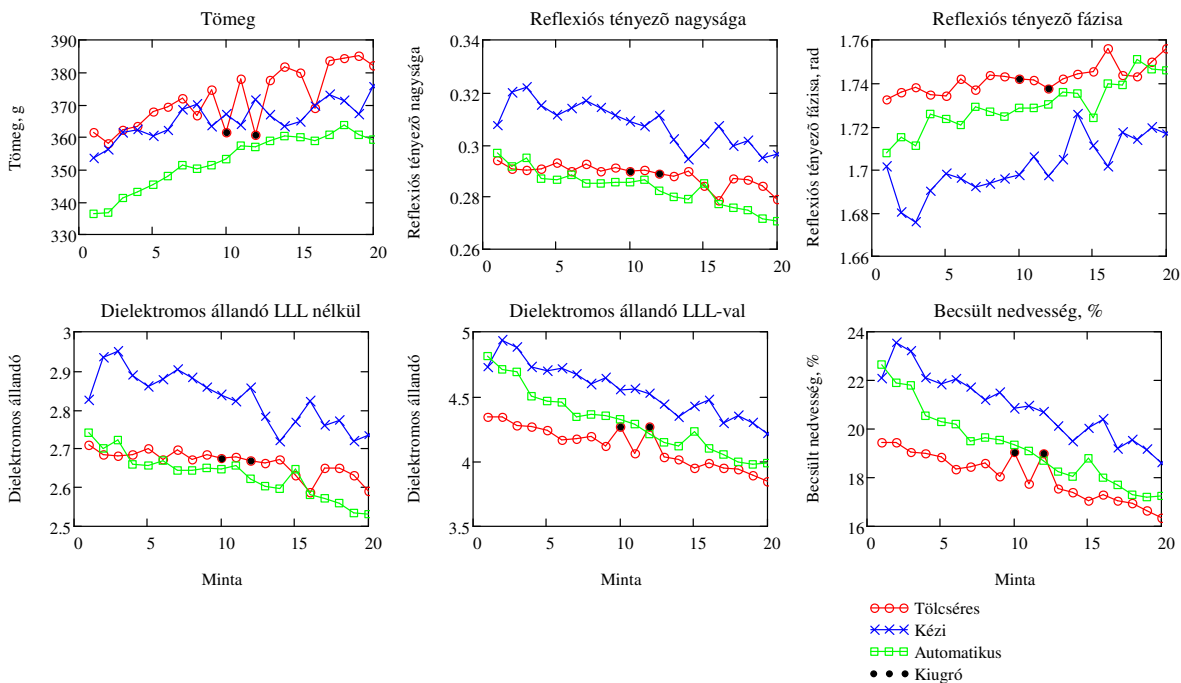


- Töléséres
- × Kézi
- Automatikus
- Kiugró

Gabona = "Szója" Nedvesség = "Nedves"



Gabona = "Zab" Nedvesség = "Nedves"



○ Tölcséres
 × Kézi
 □ Automatikus
 ● Kiugró

M7. ÁTLÁTSZÓ DOBOZ AZ ORIENTÁCIÓ VIZSGÁLATÁHOZ



M8. 2D FOURIER ALGORITMUS

```
F(A) := | S ← 0
        | for i ∈ 0.. rows(A) - 1
        |   S ← S +  $\overrightarrow{\text{cfft}(A_i)}$ 
        | S0,0 ← 0
        | S ← scale(S, 0, 255)
        | S ← equalize(S)
        | center(S)
```

Az algoritmus a Mathcad saját függvényeit használja:

cfft(A) Megadja egy mátrix 2D Fourier transzformáltját. Az eredménynek A-val azonos sor- és oszlopszáma van. Vektor esetén:

$$c_j = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sum_k v_k \cdot e^{i \cdot \left(\frac{2 \pi \cdot j}{n} \right) \cdot k}$$

ahol **n** az elemek száma.

scale(M, Min, Max) Skálázza **M** mátrix elemeit a megadott **Min** és **Max** értékek közé.

equalize(M) Megadja **M** mátrixot mint egy szürke árnyalatú kép.

center(M) A **M** mátrix DC komponenseit a mátrix középpontjába transzformálja.

M9. A FELÜLNÉZETI KÉPEK 2D FOURIER ANALÍZISÉNEK LÉPÉSEI

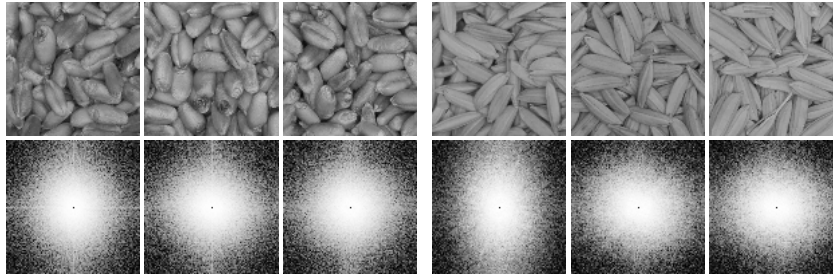
1. Fekete-fehér felülnézeti kép:



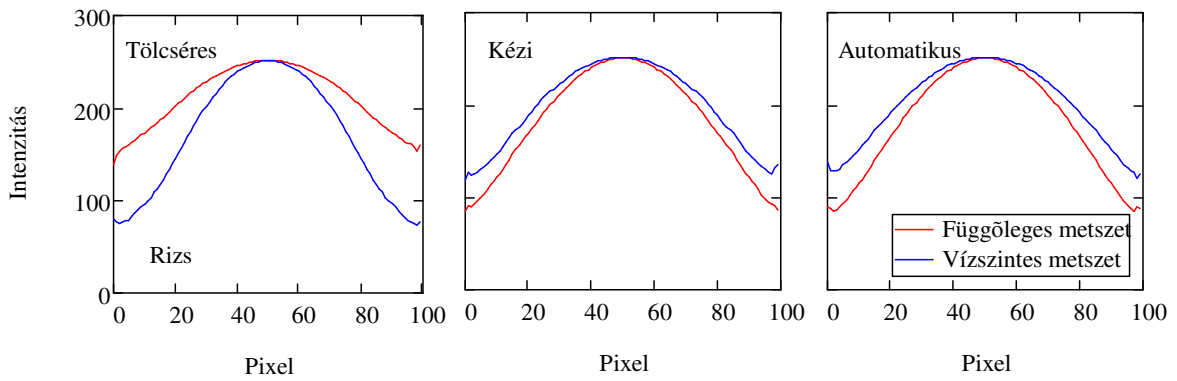
2. 14 négyzet kivágása



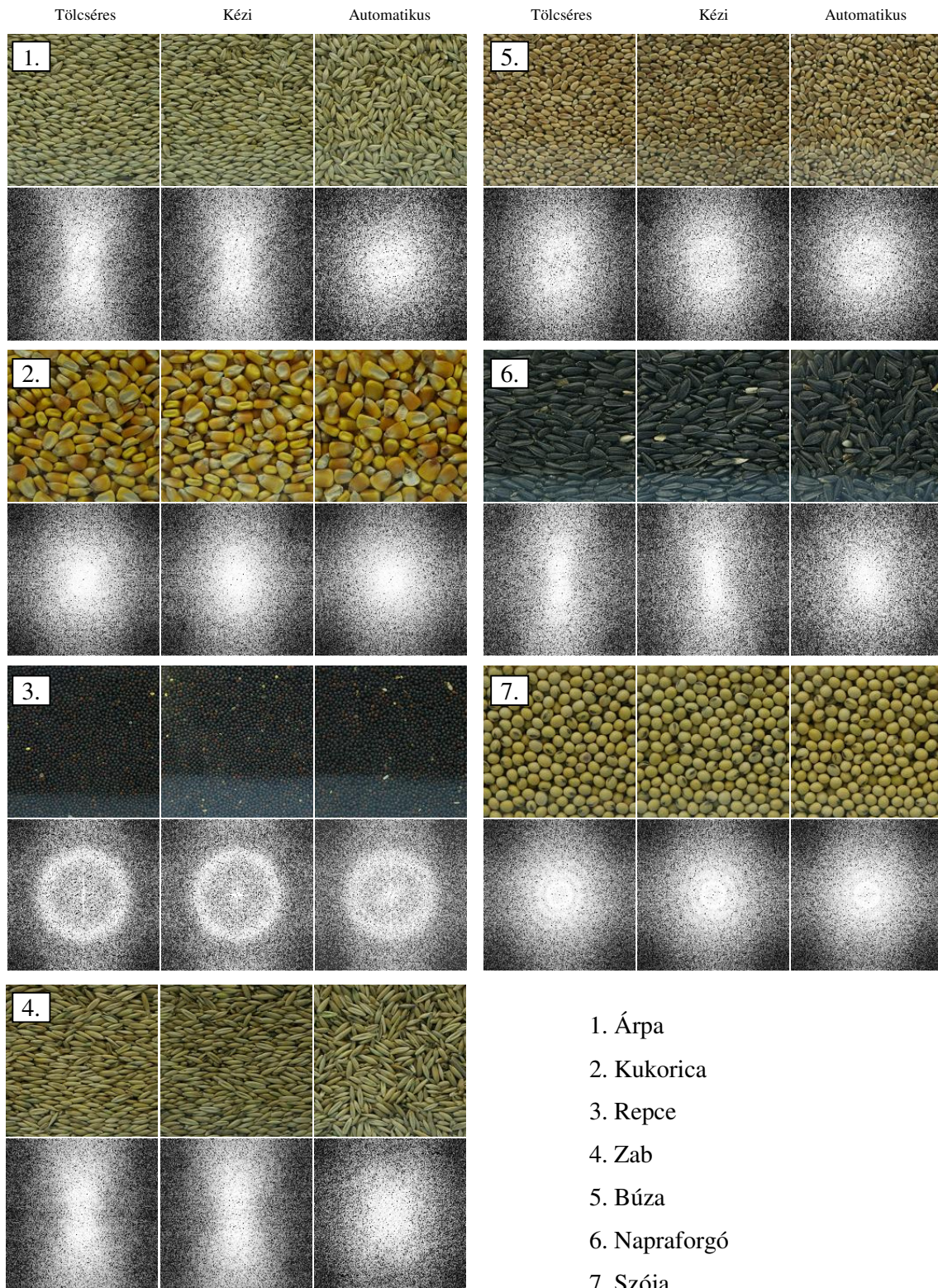
3. 14 kis kép 2D Fourier transzformáltjának átlaga



4. Intenzitás diagramok

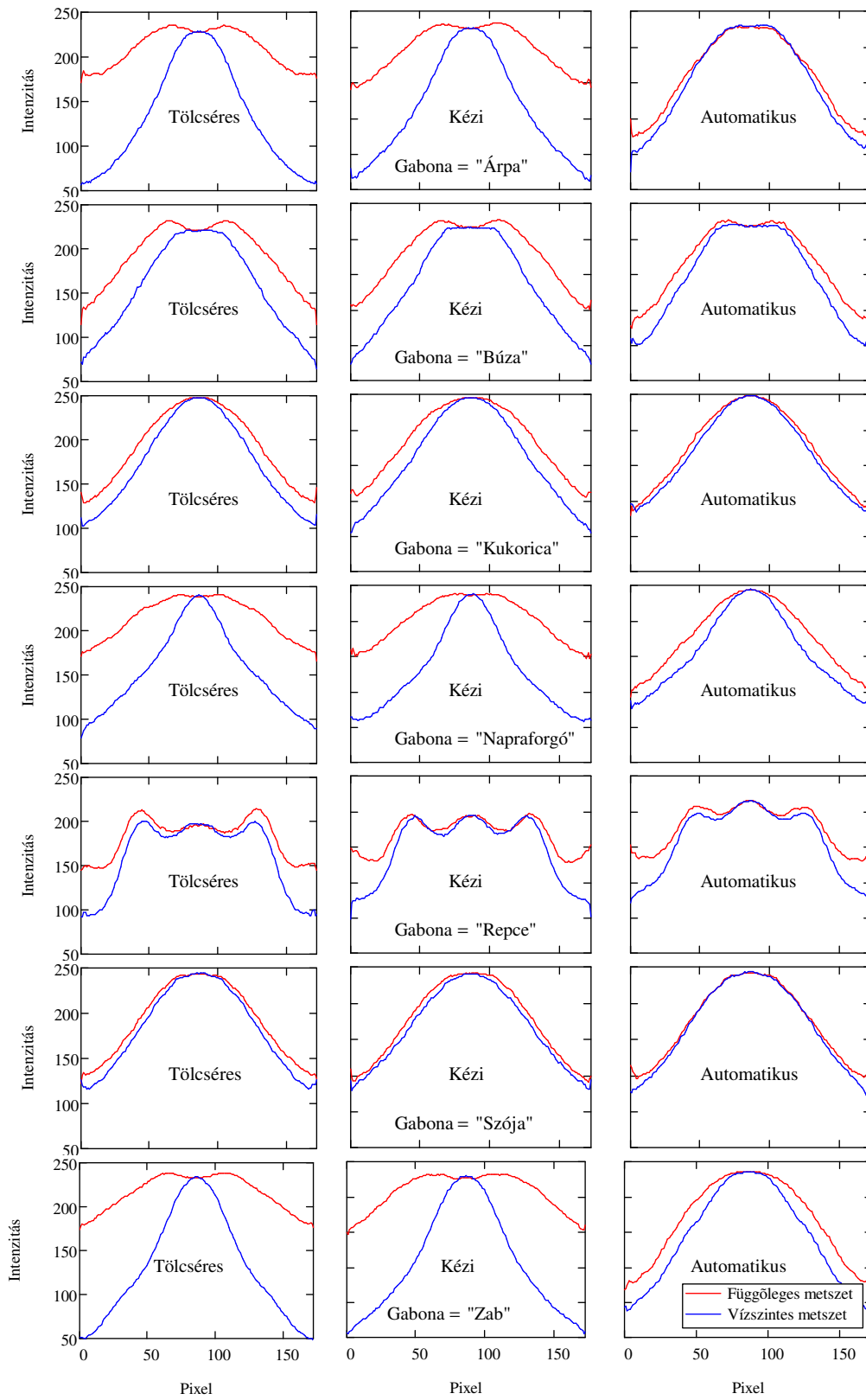


M10. OLDALNÉZETI KÉPEK ÉS 2D FOURIER TRANSZFORMÁLTJAI



- 1. Árpa
- 2. Kukorica
- 3. Repce
- 4. Zab
- 5. Búza
- 6. Napraforgó
- 7. Szója

M11. A 2D FOURIER TRANSZFORMÁLT KÉPEK INTENZITÁSAI



M12. ABCD MODELL

$$\text{ABCD}(\varepsilon, f, P, ZL) = \left(\begin{array}{l}
 c \leftarrow 299792458 \quad \omega \leftarrow f \cdot 2 \cdot \pi \\
 Z \leftarrow \text{submatrix}(P, 0, 6, 0, 0) \\
 d \leftarrow \text{submatrix}(P, 7, 12, 0, 0) \\
 \alpha \leftarrow P_{13} \cdot \frac{f}{149 \cdot 10^6} \\
 \varepsilon_{\text{dd_act}} \leftarrow P_{14} \\
 (LT1 \leftarrow P_{15} \quad LT2 \leftarrow P_{16} \quad CT \leftarrow P_{17}) \\
 \varepsilon_a \leftarrow P_{18} \\
 \varepsilon_m \leftarrow P_{19} \\
 \text{cor} \leftarrow P_{20} \\
 \left(\varepsilon f \leftarrow \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon m} + 1 + \text{cor} \quad \varepsilon_{\text{dd}} \leftarrow \frac{\varepsilon_{\text{dd_act}} - 1}{\varepsilon m} + 1 \right) \\
 \left(Z_g \leftarrow \frac{Z_3}{\sqrt{\varepsilon f}} \quad Z_d \leftarrow \frac{Z_3}{\sqrt{\varepsilon_{\text{dd}}}} \right) \\
 \left(\gamma \leftarrow \frac{\omega}{c} \cdot i + \alpha \quad \gamma_a \leftarrow \sqrt{\varepsilon_a} \cdot \frac{\omega}{c} \cdot i + \alpha \quad \gamma_g \leftarrow \sqrt{\varepsilon f} \cdot \frac{\omega}{c} \cdot i + \alpha \quad \gamma_d \leftarrow \sqrt{\varepsilon_{\text{dd}}} \cdot \frac{\omega}{c} \cdot i + \alpha \right) \\
 (ZT1 \leftarrow i \cdot \omega \cdot LT1 \cdot 10^{-9} \quad ZT2 \leftarrow i \cdot \omega \cdot LT2 \cdot 10^{-9} \quad YT \leftarrow i \cdot \omega \cdot CT \cdot 10^{-12}) \\
 M0 \leftarrow M(\gamma, d_0, Z_1) \\
 MT1 \leftarrow T(ZT1, YT, 0) \\
 MT2 \leftarrow T(0, YT, ZT2) \\
 M1 \leftarrow M(\gamma_a, d_1, Z_2) \\
 MD \leftarrow M(\gamma_d, d_2, Z_d) \\
 MG \leftarrow M(\gamma_g, d_3, Z_g) \\
 M3 \leftarrow M(\gamma_a, d_4, Z_4) \\
 M4 \leftarrow M(\gamma, d_5, Z_5) \\
 MM \leftarrow M0 \cdot MT1 \cdot M1 \cdot MD \cdot MG \cdot MD \cdot M3 \cdot MT2 \cdot M4 \\
 MS \leftarrow S(MM, Z_0, Z_5) \\
 \Gamma_L \leftarrow \frac{ZL - Z_5}{ZL + Z_5} \\
 MS_{0,0} + \frac{MS_{0,1} \cdot \Gamma_L \cdot MS_{1,0}}{1 - MS_{1,1} \cdot \Gamma_L}
 \end{array} \right)$$

$$\varepsilon = 3 - j$$

Given

$$\Gamma = \text{ABCD}(\varepsilon, f, P, ZL)$$

$$\varepsilon_{\text{ABCD}}(\Gamma, f, P, ZL) = \text{Find}(\varepsilon)$$

Egy szakasz ABCD mátrixa

$$M(\gamma, d, Z) = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot d) & Z \cdot \sinh(\gamma \cdot d) \\ \frac{\sinh(\gamma \cdot d)}{Z} & \cosh(\gamma \cdot d) \end{pmatrix}$$

Az ABCD paraméterek szórási paraméterekké konvertálása

$$S(M, Z1, Z2) = \begin{bmatrix} \frac{(M_{0,1} - M_{1,0} \cdot Z1 \cdot Z2) + M_{0,0} \cdot Z2 - M_{1,1} \cdot Z1}{(M_{0,1} + M_{1,0} \cdot Z1 \cdot Z2) + (M_{0,0} \cdot Z2 + M_{1,1} \cdot Z1)} & \frac{2 \cdot Z1 \cdot (M_{0,0} \cdot M_{1,1} - M_{0,1} \cdot M_{1,0})}{(M_{0,1} + M_{1,0} \cdot Z1 \cdot Z2) + (M_{0,0} \cdot Z2 + M_{1,1} \cdot Z1)} \\ \frac{2 \cdot Z2}{(M_{0,1} + M_{1,0} \cdot Z1 \cdot Z2) + (M_{0,0} \cdot Z2 + M_{1,1} \cdot Z1)} & \frac{(M_{0,1} - M_{1,0} \cdot Z1 \cdot Z2) - (M_{0,0} \cdot Z2 - M_{1,1} \cdot Z1)}{(M_{0,1} + M_{1,0} \cdot Z1 \cdot Z2) + (M_{0,0} \cdot Z2 + M_{1,1} \cdot Z1)} \end{bmatrix}$$

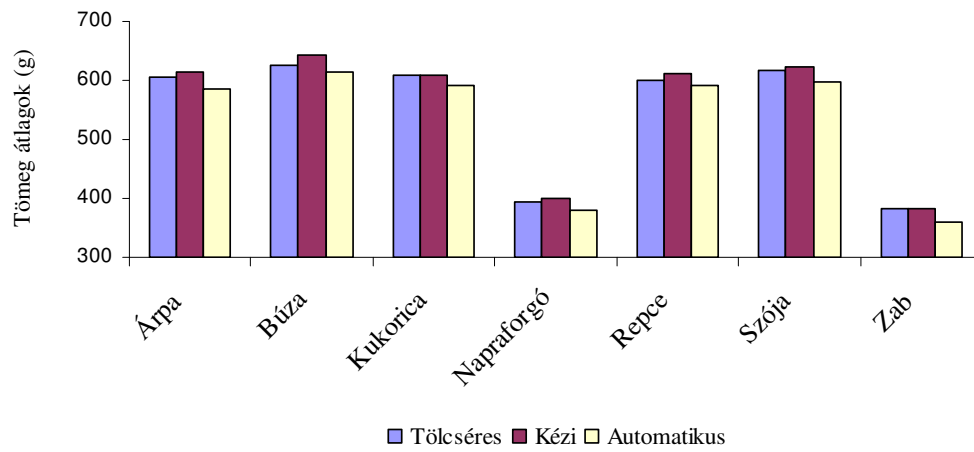
Az átmeneti szakasz ABCD mátrixa

$$T(ZT1, YT, ZT2) = \begin{pmatrix} 1 & ZT1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ YT & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & ZT2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

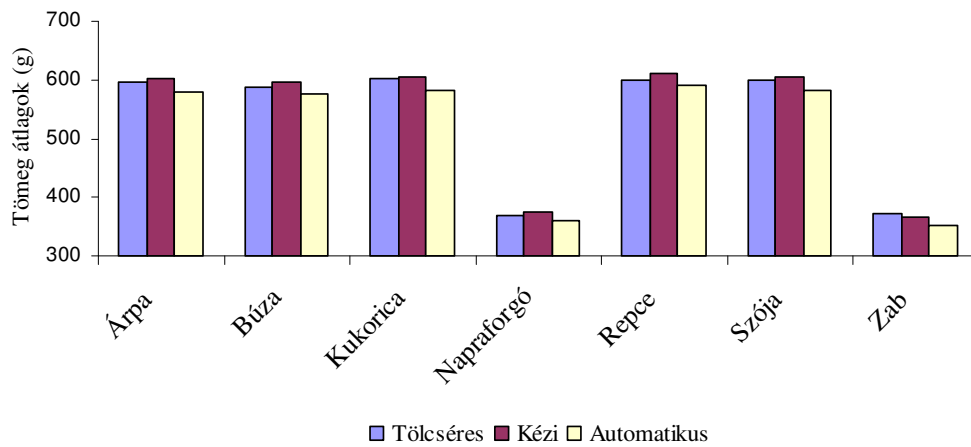
M13. MESTER TESZTCELLA PARAMÉTEREI

Elem	SFG	ABCD
Forrás hullámimpedanciája, Ω	50	50
Első konektor hullámimpedanciája, Ω	50	50
Első hullámvez. hullámimpedanciája, Ω	50	50.055
Gabona szakasz hullámimpedanciája, Ω	50	50.668
Hátsó hullámvez. hullámimpedanciája, Ω	50	50.055
Hátsó konektor hullámimpedanciája, Ω	50	50
Lezáró szakasz hullámimpedanciája, Ω	50	50
Első konektor hossza, mm	0	0.0805
Első hullámvez.hossza, mm	0.33189	0.221
Elválasztólemez vastagsága, mm	0	0.00318
Gabona szakasz hossza, mm	0.1524	0.1524
Hátsó hullámvez. Hossza, mm	0.332	0.221
Hátsó konnektor hossza, mm	0	0.0789
Kisugárzási veszteségi tényező	0	0.0055
Elválasztólemez permittivitása	1	2.9404
Induktivitás 1, nH	0	4.2276
Induktivitás 2, nH	0	5.0462
Kapacitás, pF	0	1.90645
Hullámvezető permittivitása	1	1
Kitöltési tényező reciproka	1.31713	1.2936
Ürescella-korrekción	0.22922	0.25415
Térfogat, ml	860.473	860.473

M14. BETÖLTÉSEKHEZ TARTOZÓ TÖMEGEK ÁTLAGÉRTÉKEI



Tömeg átlagának értékei száraz mintákra a 3 betöltési módszer esetén



Tömeg átlagának értékei nedves mintákra a 3 betöltési módszer esetén

M15. FELÜLNÉZETI KÉPEK

Tölcséres (rizs és búza):



Kézi (rizs és búza):

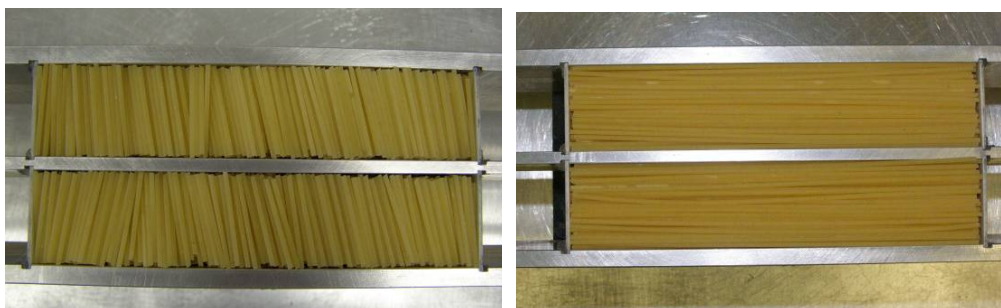


Automatikus (rizs és búza):



M16. TÉSZTAMÉRÉS AZ ORIENTÁCIÓ HATÁSÁNAK BIZONYÍTÁSÁRA

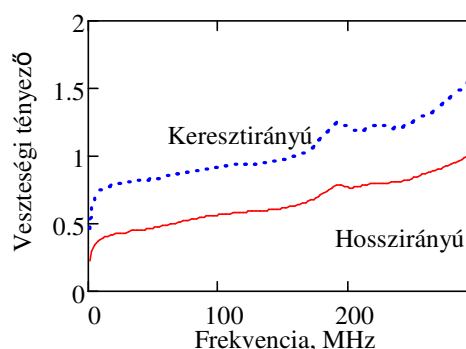
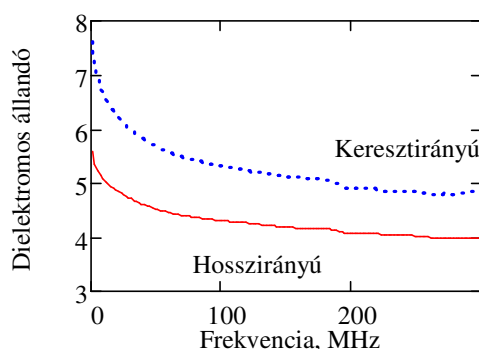
Azonos mennyiségű száraz spagetti tészta a mester tesztcellával mérve



bal: keresztirányban rendezett szálak, jobb: hosszirányban rendezett szálak

Mérési eredmények:

	Tömeg, g	Szárító- szekrényes nedvesség, %	Dielektromos állandó sűrűség korrekció nélkül	Dielektromos állandó sűrűségkorrekcióval	Becsült nedvesség, % (durumbúza)
Keresztirányú	926	9,7	5,11	3,06	12,09
Hosszirányú	925,9	9,3	4,11	2,61	8,32
Különbség	0,1	0,4	1,00	0,45	3,77



Következtetés:

A dielektromos állandó kb. azonos eltérést mutat az általunk vizsgált frekvenciatartományban. A veszteségi tényező a gabonamérésekkel ellentétben markáns különbséget mutat az általunk vizsgált frekvenciatartományban.

M17. CÉLFÜGGVÉNY A KORREKCIÓK MEGHATÁROZÁSÁHOZ

Sűrűség paraméter

$$\text{SSr}(A, B, P_B, \text{VR}) := \left\{ \begin{array}{l} P_{B21} \leftarrow \text{VR} \\ B \leftarrow \text{DC}_{\text{Grain}}(B, P_B) \\ B \leftarrow \text{MPred}(B) \\ \text{mean}(B \langle 10 \rangle - A \langle 10 \rangle) \end{array} \right.$$

Új egyesítő paraméterek

$$\text{SSr2}(A, B, P_B, \text{OPz}, \text{SP}) := \left\{ \begin{array}{l} E \leftarrow B \langle 5 \rangle \\ \text{for } i \in 0..\text{rows}(E) - 1 \\ \quad \text{em} \leftarrow P_{B2} \\ \quad \text{Corr} \leftarrow P_{B3} \\ \quad \text{VR} \leftarrow P_{B4} \\ \quad s \leftarrow \text{Group}(B_{i,0}) \\ \quad W \leftarrow B_{i,3} \\ \quad T \leftarrow B_{i,4} \\ \quad \varepsilon_{\text{dens}} \leftarrow \left[\left[\left(\frac{1}{\text{Re}(E_i)} - 1 \right) \cdot \frac{\rho_{\text{grain}} \cdot P_{B21}}{W} + 1 \right]^3 \right. \\ \quad \varepsilon_{\text{adj}} \leftarrow (\varepsilon_{\text{dens}}) \cdot \text{SP}_s + \text{OPz}_s + \frac{\text{TP}_s}{6} \\ \quad M1 \leftarrow \sum_{r=0}^5 (KCC_r \cdot \varepsilon_{\text{adj}}^r) \\ \quad M_i \leftarrow M1 - KTC_{s,1} \cdot \frac{9}{5} \cdot (T - 25) - \text{TP}_s \\ \quad \left. \sum \left(\overrightarrow{(M - A \langle 10 \rangle)^2} \right) \right. \end{array} \right.$$

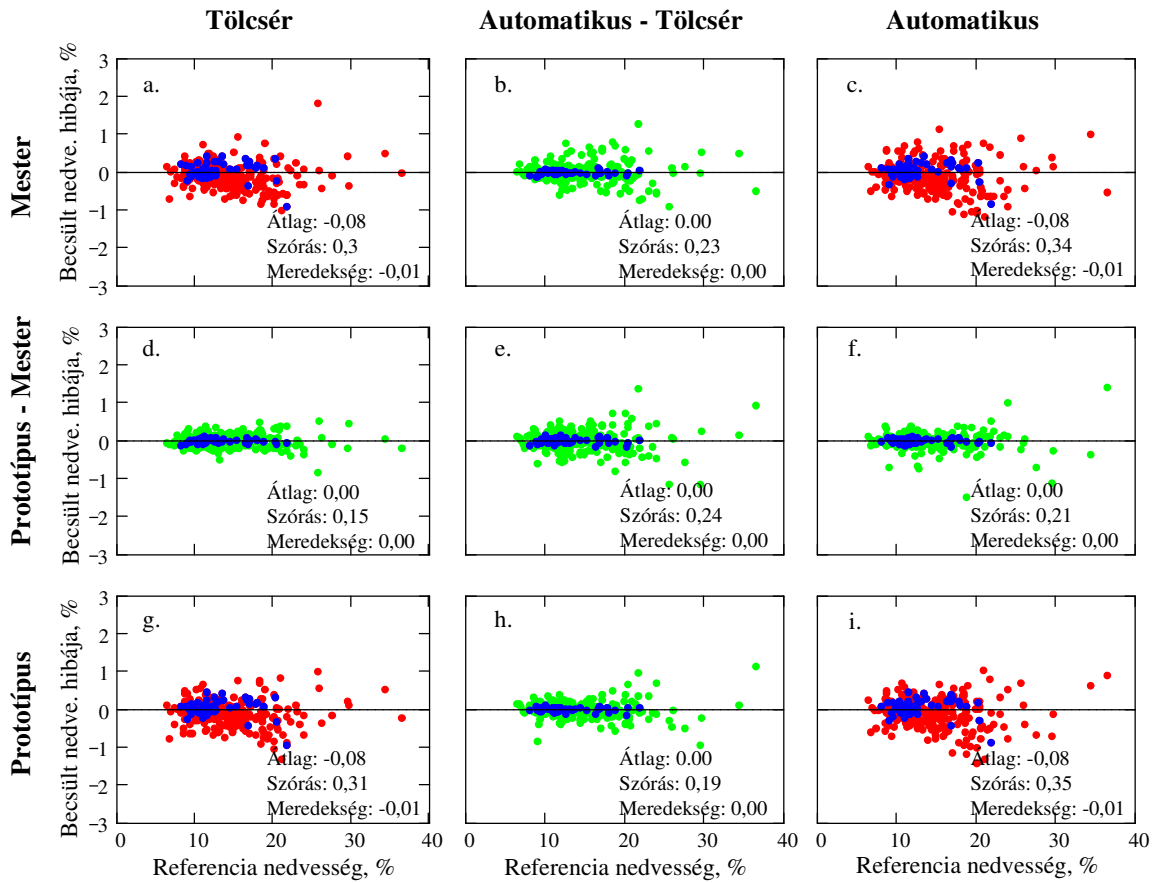
$$\text{OPz} := \overrightarrow{(2.5 - \text{OP} \cdot \text{SP})}$$

Given

$$\text{SSr2}(A, B, P_B, \text{OPz}, \text{SP}) = 0$$

$$f2(A, B, P_B) := \text{Minerr}(\text{OPz}, \text{SP})$$

M18. KALIBRÁCIÓÁTVITEL LINEÁRIS KORREKCIÓKKAL



Nedvesség mérési hibák (a, c, g, i) és kereszt eltérések (b, d, e, f, h) lineáris korrekcióval;

a mérés módját körben a feliratok jelölik; kék pontok: szójaminták

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

EZÚTON IS SZERETNÉM MEGKÖSZÖNNI:

- dr. David Funk professzor úrnak a folyamatos, több éven át tartó önzetlen segítségét,
- dr. Fekete András professzor úrnak a tanácsait és vezetését,
- dr. Felföldi József professzor úrnak a szakmai támogatását,
- a USDA-GIPSA-TSD volt és jelenlegi vezetőinek, hogy lehetőséget biztosítottak, hogy együtt dolgozhattam Dr. David Funk professzor úrral,
- a USDA-GIPSA-TSD azon dolgozóinak, akik a mérések nagy részét végezték,
- dr. Stuart Nelsonnak (USDA-ARS), hogy a mester tesztcellát tanszékünk rendelkezésére bocsátotta,
- dr. Kurt Lawrencenek tanácsait és információit,
- diplomamunkásaimnak: Hartyán Piroskának, Bucsek Balázsnak és Losonczi Péternek értékes mérési munkájukat,
- dr. Mészáros Péternek a közös munkát,
- dr. Budai Juditnak a témával kapcsolatos információit,
- az Oktatási Minisztériumnak a Deák Ferenc ösztöndíjat,
- az OTKA-nak, hogy támogatásukból az Agilent 4991A műszert megvehettük,
- a tanszék minden dolgozójának a támogatást,
- és családomnak a türelmet.