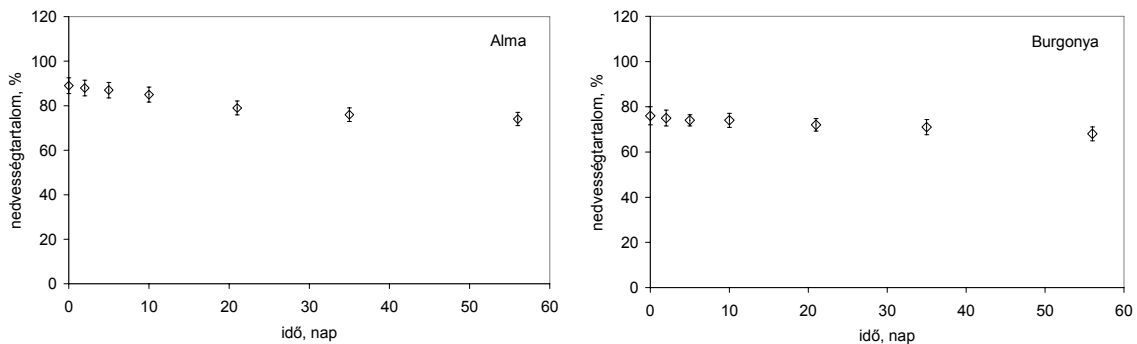


## Célok

Egyrészt zöldségek, gyümölcsök elektromos impedancia spektrumának meghatározása, illetve a növényi szövet impedancia spektrumának leírása különböző elektromos modellekkel. A modell paraméterek (impedancia paraméterek) összehasonlítása más – korábban minőség jellemzésre felhasznált – fizikai paraméterekkel. Lehetőség szerint az elektromos impedancia paraméterek felhasználása minőségbecslésre, pl. szárítási folyamat során nedvességtartalom csökkenés követésére.

## Anyagok

A méréseket piacon beszerezhető almákon és burgonyákon végeztük el. A különböző minőséget az almák és burgonyák szobahőmérsékleten történő tárolásával érték el. A tárolási idő 6-8 hét volt. Az alma nedvességtartalma kb. 89%-ról csökkent 75 %-ra, a burgonya nedvességtartalma pedig 75 %-ról 68 %-ra a tárolási idő alatt (1. ábra).



1. ábra

A nedvességtartalmat a nedves tömegről vonatkoztatva határoztuk meg tömegméréssel.

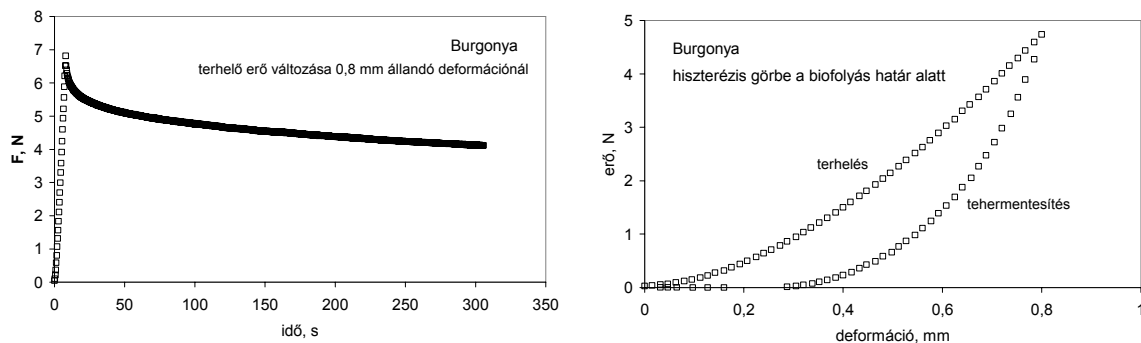
A 2 cm x 2 cm x 1 cm méretű alma szeletek szárítása 50°C-n egy Venticell laboratóriumi szárítóban történt.

Répák szállító és raktározó szövein is végeztünk méréseket.

## Mérési módszerek

### Reológiai mérések

Egy TA-XT2 típusú állományvizsgálóval határoztuk meg a mechanikai hiszterézis görbéit, illetve az állandó deformáció során mérhető erő csökkenését (2. ábra).



2. ábra

A hiszterézis görbéből a rugalmassági fokot határoztuk meg: a tehermentesítés görbe alatti területet osztottuk a terhelés görbe alatti területtel. Az állandó deformációnál fellépő erő csökkenést az

$$A\sigma(t) = A\sigma_o + A\sigma_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + A\sigma_2 e^{-\frac{t}{T_2}} + A\sigma_3 e^{-\frac{t}{T_3}} \quad (1)$$

általánosított Maxwell modellel közelítettük, ahol  $T_1 = \frac{\eta_1}{E_1}$ ,  $T_2 = \frac{\eta_2}{E_2}$ ,  $T_3 = \frac{\eta_3}{E_3}$  relaxációs idők,  $\eta_1, \eta_2, \text{ és } \eta_3$  viszkozitások,  $E_0, E_1, E_2 \text{ és } E_3$  rugalmassági modulusok. A terhelést létrehozó 6 mm átmérőjű penetrométeres fej keresztmetszete. A  $\sigma_0 = E_0 \varepsilon_0, \sigma_1 = E_1 \varepsilon_0, \sigma_2 = E_2 \varepsilon_0 \text{ és } \sigma_0 = E_3 \varepsilon_0$  a megfelelő feszültségek,  $\varepsilon_0$  a relatív deformáció és  $t$  az idő (1).

### Színmérések

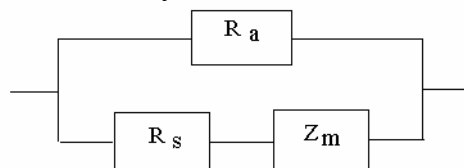
Az almák színét egy reflexiómérésen alapuló HunterLab gyártmányú UltraScan színmérővel határoztuk meg 375 nm –től 1100 nm-ig 5 nm-s lépésközzel. A megvilágítási geometria ( $d/8^\circ$ ) megfelel a nemzetközileg elfogadott CIE (Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság) szabványának. A reflexiós spektrumokból a CIE szabványnak megfelelő integrálással meghatároztuk a színinger koordinátákat.

### Elektromos impedancia mérések

Az elektromos impedancia a fogyasztóra kapcsolt váltakozó feszültség és ennek hatására a fogyasztón átfolyó váltakozó áram hányadosa. Az élő szövetek impedanciája kapacitív jellegű, mivel a biológiai membránok, ill. a töltött csoportokkal rendelkező részecskék az elektromos térben polarizálódnak. Az 1000 Hz – 1 MHz alacsony frekvencia tartományban általában a biológiai membrán állapotáról lehet felvilágosítást nyerni (2).

Az impedancia spektrumokat 30 Hz -1 MHz frekvencia tartományban 1 V-s mérő feszültséggel egy HP 4284A precíziós LCR mérővel határoztuk meg. A mért spektrumokat korrigáltuk a kábel hosszra, a szórt induktivitásra és kapacitásra. A spektrumokat többféle elektróddal határoztuk meg. Kétféle tű elektród: a.) 16 mm hosszú, 0,6 mm átmérőjű arannyal fedett réz elektródok, távolságuk rendre 1,8 mm, 4,6 mm és 6,8 mm volt; b.) 4 mm hosszú, 0,6 mm átmérőjű szintén arannyal borított réz elektródok, amelyek távolsága 2 mm, 5 mm, 10 mm és 20 mm volt. Háromféle EKG elektródot használtunk: 1.) 3M Red Dot tapasz elektródokat ( Ag/AgCl), 2.) FiabSpa gyártmányú 1 cm átmérőjű (Ag/AgCl) elektródokat és World Precision Instrument gyártmányú RC2 Ag/AgCl elektródokat. A tű elektródok esetén mért impedancia értékek tartalmazták az elektródra jellemző impedanciákat, amelyet korrekcióval számításba vettünk. Az EKG elektródok esetén az elektród impedancia alacsony értékű, ezért nem alkalmaztunk ilyen korrekciót.

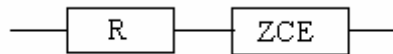
A mért impedancia spektrumokat különböző elektromos modellekkel közelítettük. Vizsgálatink elején főleg a módosított Hayden-modellt használtuk:



Ez a modell nagyon egyszerű: az  $R_a$  és az  $R_s$  ellenállások a sejtek közötti állomány (apoplazma) és a sejteken belüli állomány (szimplazma) ellenállását jelenti, a  $Z_m$  impedancia a sejt membrán impedanciáját jelenti. Ebben a formában csak akkor ad ez a modell helyes eredményt, ha feltételezzük, hogy a membrán impedancia függ a frekvenciától. Egyszerűsége folytán ez a modell jól használható, könnyű magyarázni vele a különböző hatásokra kialakuló ellenállás változásokat.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_s + Z_m}}$$

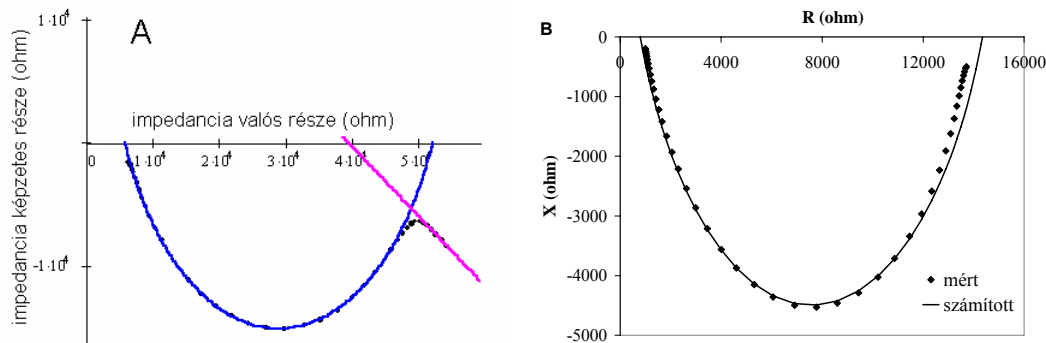
Későbbiek során a mért spektrumok közelítésére az ún. Cole-elemet, egy elosztott paraméterű elemet (ZCE) és vele sorba kapcsolt ohmos ellenállást (R) használtunk:



$$Z_{ZCE} = \frac{R_o}{1 + (j\tau\omega)^\Psi}, Z = R + Z_{ZCE}$$

$R_o$  az impedancia spektrumot leíró körív által a valós tengelyből kimetszett szakasz,  $\tau$  relaxációs idő,  $\Psi$  egy kitevő, amelynek értéke annál közelebb van az egyhez, minél jobban közelít az elosztott paraméterű elem egy veszteségmentes kapacitásból és egy tökéletes ohmos ellenállásból álló párhuzamos RC taghoz. Ez utóbbi modellel pontosabb közelítést lehet adni a mért spektrumra, de nem lehet a modell egyes elemeit a biológiai szövet alkotórészeihez rendelni. Ennél a modellen is, a valós tengely és az impedancia spektrum körívének metszéspontjaihoz hozzá lehet rendelni az  $R_a$  ellenállását, illetve az  $R_a R_s / (R_a + R_s)$  ellenállásokat, s így azok meghatározhatóak.

Egy-egy tipikus görbeillesztés látható a Cole-elemmel (3.A ábra) és a módosított Hayden-elemmel (3.B ábra). A Cole-elem pontosabb illesztést tesz lehetővé (F-próbával igazoltuk)



3. ábra

Azokban az esetekben, amikor a kis frekvenciáknál egy újabb polarizációs jelenség látható (3.A ábra jobb oldalán a körívhez csatlakozó rész), a mért pontokat egy egyenessel közelítettük, mivel kevés pont állt rendelkezésre egy köríves közelítésre.

Alma szeletek esetén összehasonlító méréssel meghatároztuk a szelet elektromos permittivitását. Ugyanolyan alakú és geometriai elrendezésű edénybe, mint az alma szelet, desztillált vizet öntöttünk, és megmértük az impedancia spektrumot. Ismerve a víz dielektromos állandóját és fajlagos vezetőképességét, kiszámítottunk egy - a mérési elrendezésre érvényes - geometriai faktort. Ennek ismeretében az alma szelet ismeretlen dielektromos állandóját és fajlagos vezetőképességét meghatároztuk. Ebben az eljárásban feltételeztük, hogy az almaszövet homogén, és impedanciája leírható egy párhuzamos RC taggal.

## Eredmények

### Reológiai mérések

Burgonyákon és almákon meghatároztuk az (1) összefüggésben szereplő paramétereket, illetve a hiszterézis görbékből a rugalmassági fokot. Megállapítottuk, hogy a rugalmassági fok és a rugalmassági modulusok exponenciálisan csökkennek a nedvességtartalom csökkenésével. Ugyancsak exponenciális csökkenést mutatnak a viszkozitások és a relaxációs idők is. Ezek az eredmények megfelelnek a szakirodalomban megtalálható adatoknak (3).

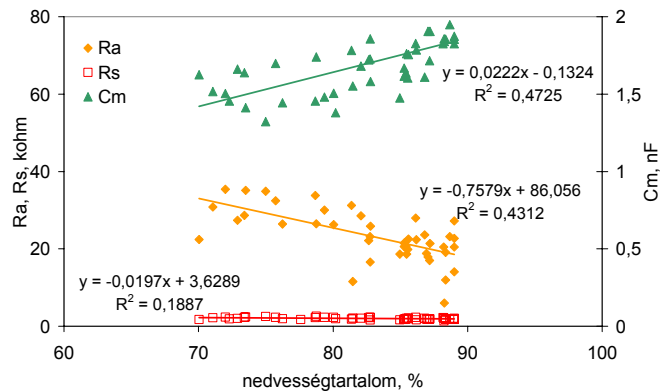
### Színmérések

Az almák színe a tárolási idő alatt praktikusán nem változott.

## Impedancia mérések

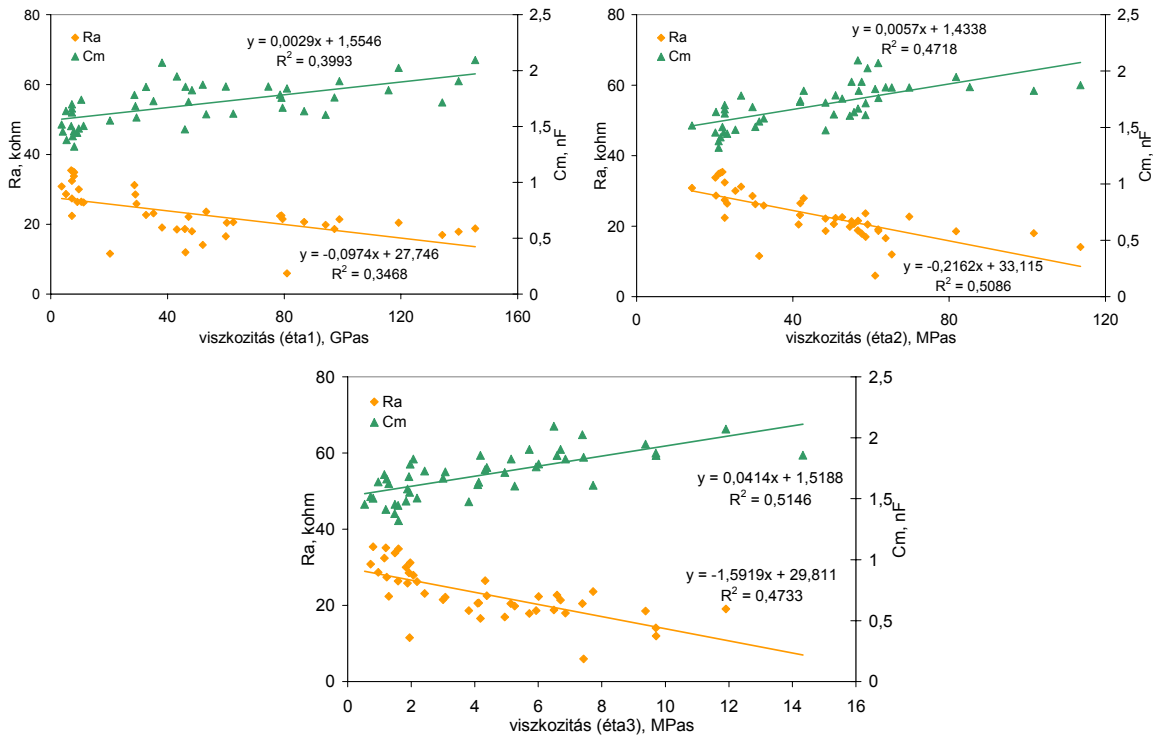
### Alma impedancia spektrumok

Az impedancia spektrumokat az almákon az alma egyenlítője mentén azokon a helyeken határoztuk meg, ahol a reológiai méréseket is végeztük. Így a mért spektrumok közelítése során kapott impedancia paraméterek és reológiai jellemzők között várható az összefüggés. A tárolási idő alatt az almák sejten belüli állományának ellenállása gyakorlatilag nem változott. A sejtek közötti állomány ellenállása növekedett a tárolás – a nedvességtartalom csökkenése során (4.ábra). A sejt membrán ellenállása szintén nem változott a mérési periódus alatt. A sejtthártya kapacitása csökkent a vizsgált idő tartományban.



4. ábra

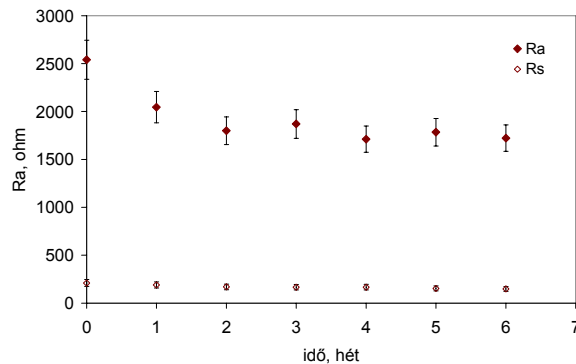
Meghatároztuk az összes impedancia és reológiai paraméter között a korrelációt. Példaként mutatjuk be a három viszkozitási paraméter és a sejt közötti ellenállás és a sejt membrán közötti kapcsolatot (5.ábra). Érdekes, hogy a viszkozitás növekedésével az ellenállás csökken, illetve a kapacitás növekszik. Ennek az lehet az oka, hogy a viszkozitások gyorsabban csökkennek a nedvességtartalom csökkenésével, mint ahogyan az ellenállás növekszik. Ez arra utal, hogy a tárolás során nem csak a nedvesség távozott az almából, hanem szerkezetváltozás is lezajlott.



5. ábra

## Burgonya impedancia spektrumok

Burgonyák esetében is ugyanazon a helyen mértük (a burgonya felszínén) az állandó deformáció során az erő csökkenését, illetve a mechanikai hiszterézis görbét, ahol az impedancia spektrumokat határoztuk meg.

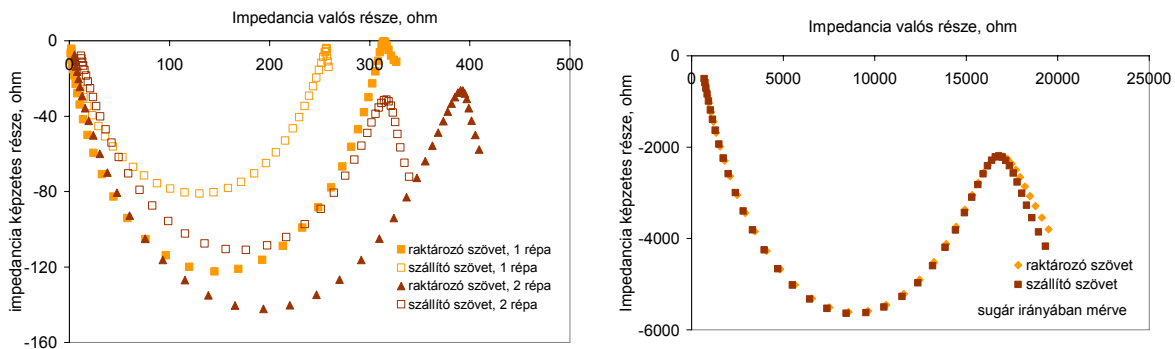


6. ábra

A burgonyánál is lényegében az  $R_a$  ellenállás változott a tárolás folyamán, és az  $R_s$  értéke közel azonos maradt a vizsgált idő tartományban (6.ábra). A burgonyák esetében meghatároztuk burgonyaszövet dielektromos állandóját a tárolás folyamán. 2 cm átmérőjű korongokat vágunk ki a burgonyákból. Kis frekvenciáknál (100 Hz - 1000 Hz) gyakorlatilag nem változott, míg magasabb frekvenciatartományban (1000 Hz – 100000 Hz) a dielektromos állandó növekedett.

## Répa impedancia adatok

Répa szövetek impedancia spektrumának mérésével szemléltettük, hogy a szállító szövetben az ellenállás kisebb a raktározó szövet ellenállásához képest a szállítás irányában mérve. A szállítási irányra merőleges irányban (a répa sugarának irányában) a két szövet ellenállása közel azonos (7.ábra).



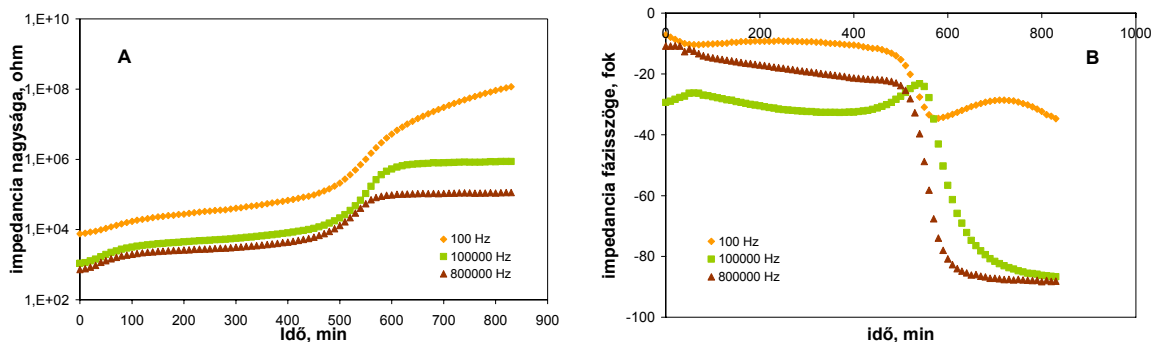
7. ábra

A burgonya és répa mérések kiértékelése még folyamatban van. A reológiai és impedancia paraméterek összefüggéséről egy átfogó közleményt szándékozunk készíteni.

## Alkalmazások

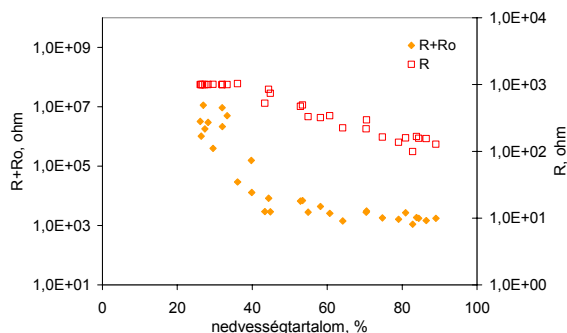
### Impedancia paraméterek változása a szárítás során

Alma szeletek szárítása során mértük az impedancia nagyságát és fázisszögét (8.ábra)



8. ábra

Megfigyelhető, hogy a szárítás kezdetén – a szelet felmelegedése során - az impedancia növekedése viszonylag gyors. Ezt egy lassúbb szakasz követi, amikor a száradást a kapillárisokban levő víz párolgása határozza meg. A száradás következő szakaszában a diffúzió által meghatározott szakaszban egy újabb gyors növekedés következik, majd egy állandó értéket ér el az impedancia a magasabb frekvenciáknál. A fázisszög változása csak a magasabb frekvenciáknál alkalmas a szárítási folyamat követésére, mert az alacsonyabb frekvenciáknál a fázisszög változása nem monoton függvény.

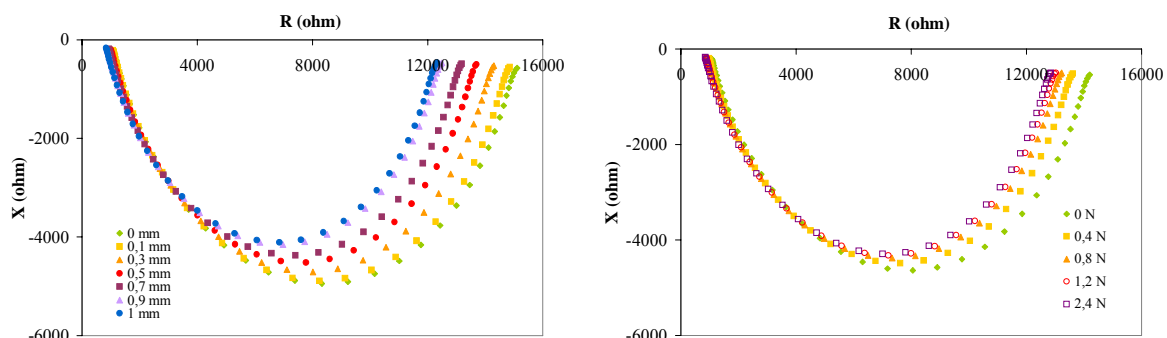


9. ábra

Hasonló változások figyelhetők meg a különböző impedancia paraméterekben a nedvességtartalom csökkenésével. A Cole-modell minden paraméterének változása alkalmas lehet a szárítási folyamat követésére (9ábra).

Impedancia paraméterek változása az elektródra ható nyomás esetén

A sík EKG elektródák használatánál oda kell figyelni az elektródot a szövethez nyomó erő nagyságára, ugyanis az impedancia nagysága csökken, ha a nyomás növekszik az elektródra. Megfigyeltük az impedancia reverzibilis csökkenését kis deformációk, ill. kis erők hatása alatt. Az erők és a deformációk a biofolyás határ alatt voltak. Egy henger alakú mintát vágunk ki almászövetből és az elektródára ható nyomást a TA-XT2 állományvizsgáló műszerrel állítottuk be.

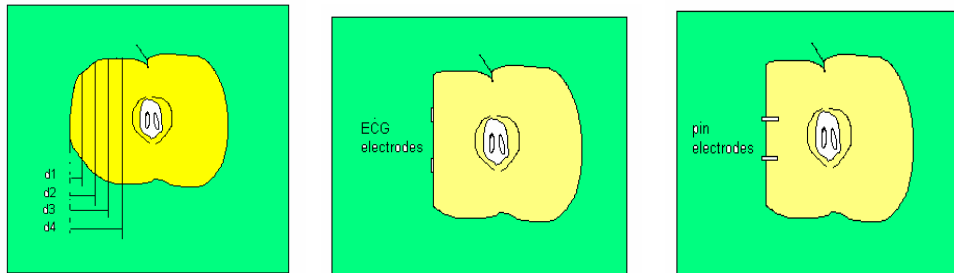


10. ábra

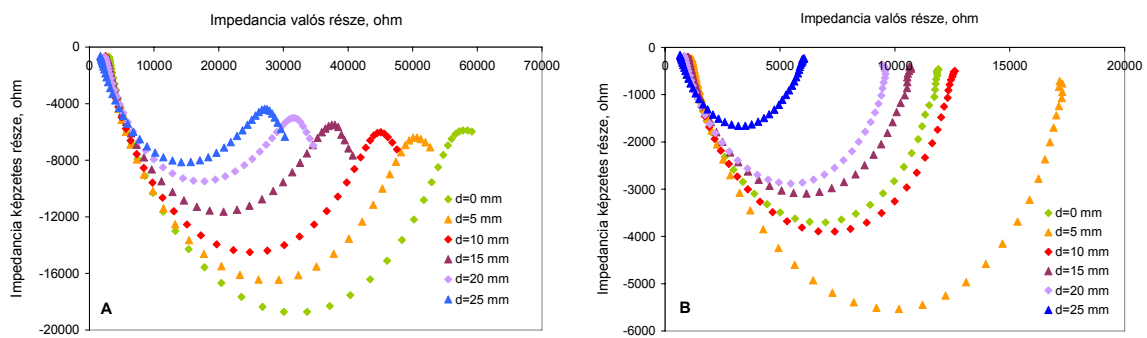
A nyomás által létrehozott hosszváltozásnál nagyobb mértékben változó impedancia változás arra utal, hogy a nyomás alatt a szerkezet megváltozik. Valóban, a fajlagos ellenállások értéke csökken a nyomás hatása alatt.

Az alma impedanciája a héjtól a mag felé

A 11. ábrán szemléltetett módon, a héjtól a magház felé haladva, különböző helyeken meghatároztuk az almaszövet impedanciáját. Megfigyeltük (12. ábra), hogy a héj alatt nagyobb az impedancia spektrum körívének sugara, a magház felé haladva csökken a sugár. Ennek oka egyrészt az, lehet, hogy a sejtek mérete a magház közelében nagyobb, másrészt a magház környékén több csatorna figyelhető meg az almaszövetben (3).



11. ábra



12. ábra

Az impedancia csökkenést egyformán mutatja a tű elektróddal (A), ill. az EKG elektróddal (B) mért görbe sereg.

## Irodalom

1. Sítkei György Mezőgazdasági anyagok mechanikája, Akadémiai Kiadó, Budapest
2. Grimnes, s., Martinsen, O.G. Bioimpedance and Bioelectricity, Basics, 2000. Academic press, New York
3. Mohsenin, N.N. Physical Properties of Plant and Animal Materials 1986. Gordon and Breach, New York