

## Zárójelentés a

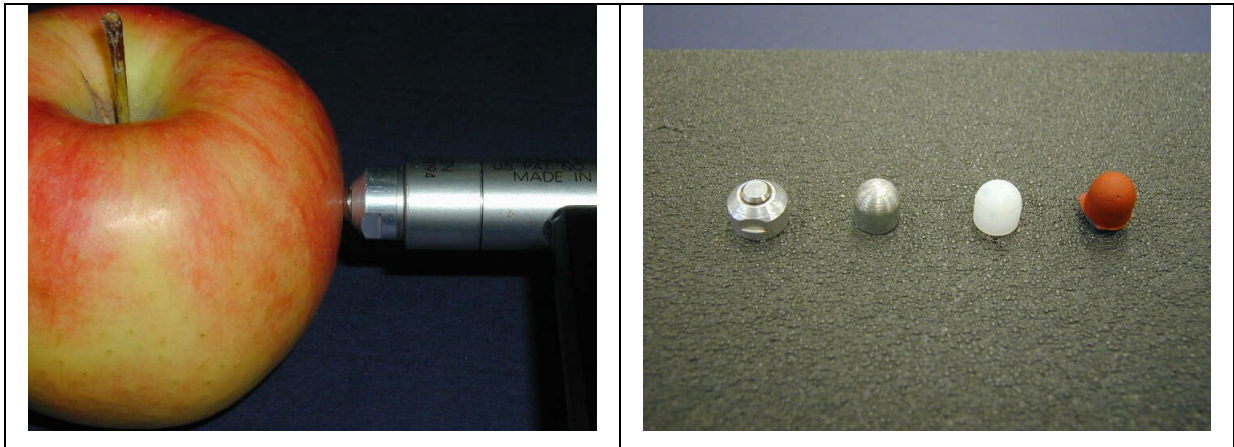
“Módszer kidolgozása kertészeti termények felületi és belső keménység-jellemzőinek meghatározására” c. kutatómunkáról (OTKA T046756 AG4)

A kutatás első évében (2004) elvégzett részfeladatok:

Kialakítottuk a precíziós dinamikus állományvizsgálatok eszköz-hátterét:

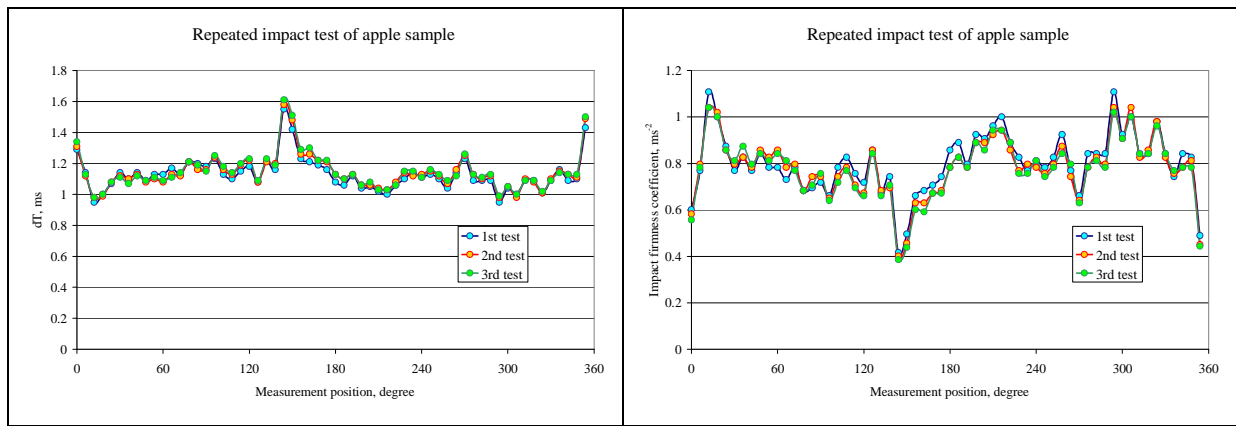
- a metodikai vizsgálatokban elemzett paraméterek reprodukálható beállítását lehetővé tévő hardver eszközöket és laboratóriumi környezetet,
- az akusztikus rendszert és az ütővizsgálatokat hasonló rendszerben támogató, felhasználóbarát szoftvert

Metodikai vizsgálatokat végeztünk a vizsgálat reprodukálhatósága és roncsolás-mentessége tekintetében. Magával a precíziós rendszerrel tudtuk vizsgálni az ismételt vizsgálatok hatását a termény mechanikai jellemzőire. A rendszerben lehetővé tettük a különböző alakú és anyagú ütőfejek (1. ábra) alkalmazását és vizsgálatát a mérés reprodukálhatósága és roncsolás-mentessége szempontjából.

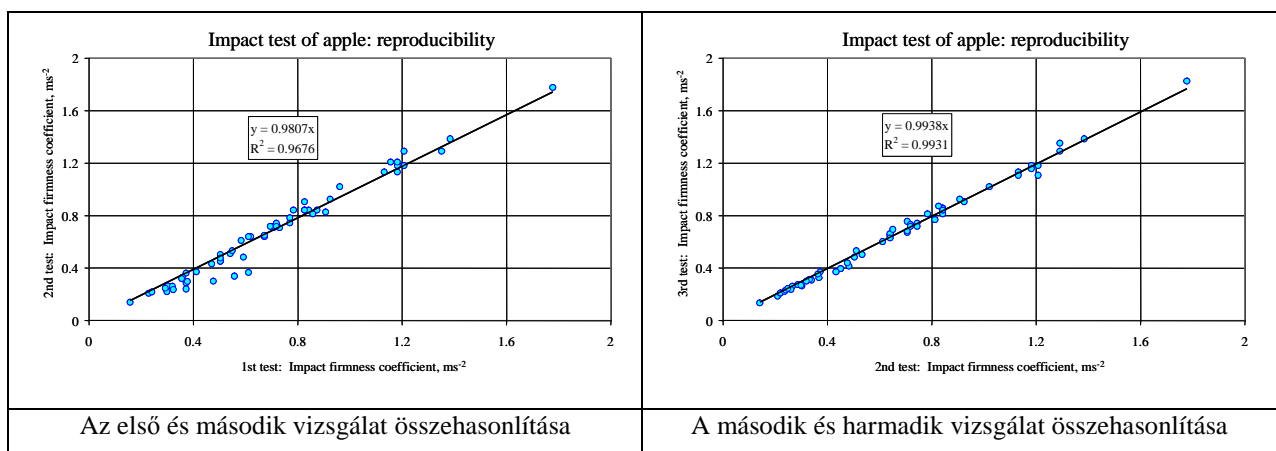


1. ábra: Vizsgált ütőfej-alakok és anyagok

Különböző fajokra és fajtákra szabatos vizsgálati módszereket dolgoztunk ki, ezen belül definiáltuk a mérésekben alkalmazható maximális – még roncsolásmentes – mechanikai impulzus nagyságát. A vizsgálat alapja az azonos körülmények (mérési hely, impulzus stb.) között ismételt mérések összehasonlítása, korreláció-analízise (2. és 3. ábra).



2. ábra: Almaminták kerületi keménységértékeinek ismetelhetősége (ütésvizsgálat)



Az első és második vizsgálat összehasonlítása

A második és harmadik vizsgálat összehasonlítása

3. ábra: Az ütésvizsgálat mechanikai hatásának elemzése: változás az első vizsgálat után

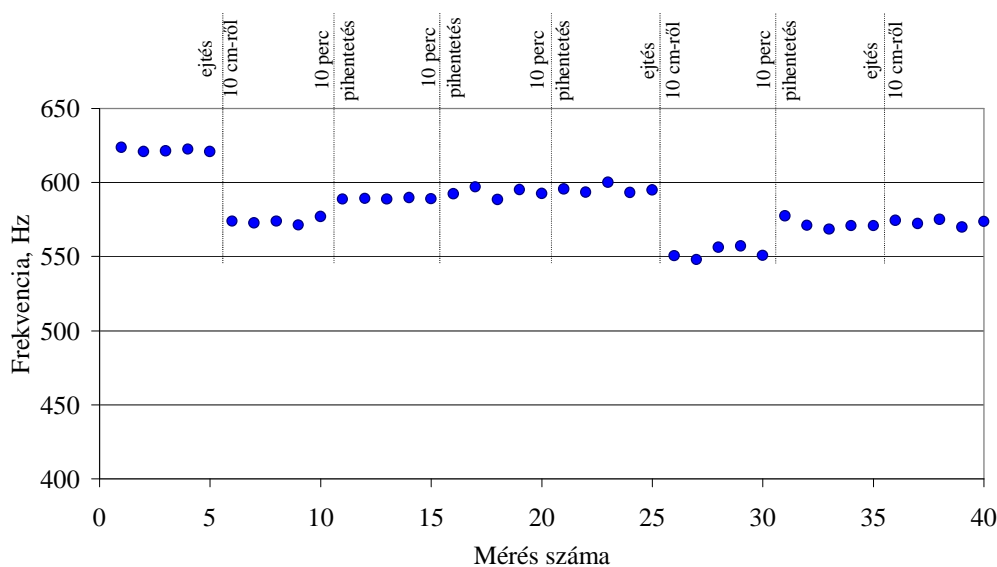


4. ábra: Az ütésvizsgálat mechanikai hatása 1 hét tárolás után  
(fém impaktor, 0.02 kg\*m/s ütési impulzus)

A legérzékenyebbnek a vizsgált termény-körből az alma- és körtefajták bizonyultak (0,005-0,01 kg\*m/s impulzus fölött bizonyítottuk a még láthatatlan, de már szignifikánsan mérhető maradandó hatást, 4. ábra), míg pl. paradicsom esetén egy nagyságrenddel nagyobb gerjesztési impulzus sem okoz maradandó mechanikai hatást. Ezen limitek tisztázása feltétlenül szükséges volt a tervezett in-vivo mérések korrekt lebonyolításához.

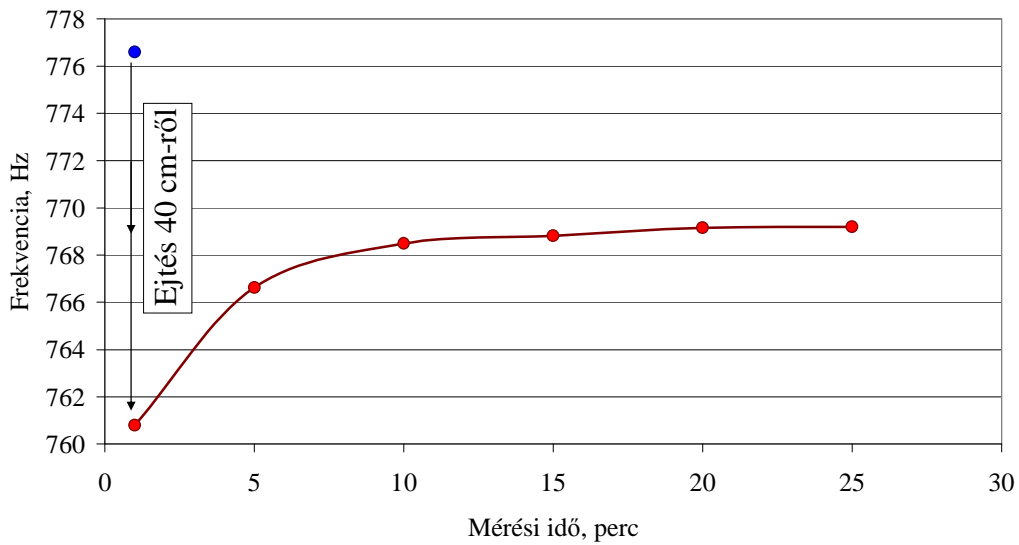
A kifejlesztett rendszert használva vizsgáltuk kis mechanikai sérülések hatását a termény mechanikai állapotára. A precíziós akusztikus rendszert kifejezetten alkalmasnak találtuk a globális állományban bekövetkező rendkívül kismértékű változás detektálására. A terhelés modellezésére a vizsgált terményeknél az ejtést alkalmaztuk. A rendszerrel olyan kismértékű hatásokat is szignifikánsan kimutattunk, amelyek semmilyen látható elváltozás nem okoztak és semmilyen más módszerrel sem mutathatóak ki (pl. paradicsom: ejtés 5 cm magasról, hagyma: ejtés 30 cm magasról). A módszerrel jól követhető volt a bekövetkezett mechanikai változás részleges relaxációja is (5. és 6. ábra).

Paradicsom: ejtés hatásának vizsgálata akusztikus méréssel



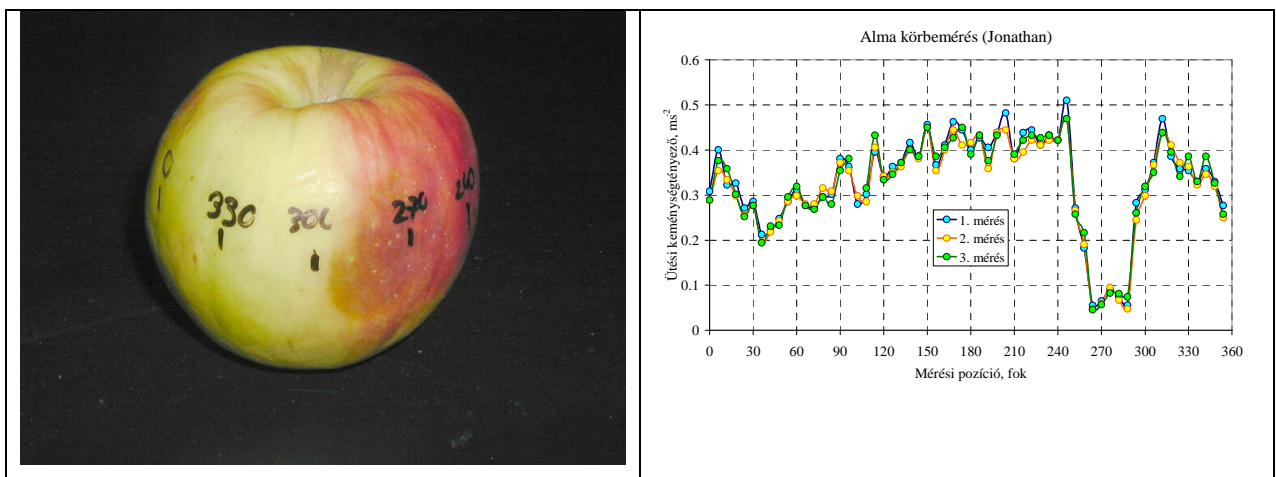
5. ábra: Mechanikai terhelés (ejtés) hatása paradicsomra

### Hagyma: ejtés hatásának vizsgálata akusztikus méréssel



6. ábra: Mechanikai terhelés (ejtés) hatása hagymamintára

A felületi hatások, sérülések detektálására az ütésvizsgálati módszert találtuk alkalmasnak, de – a termények bizonyított igen nagy természetes felületi keménység-variabilitása miatt – kizárólag az azonos ponton megismétel vizsgálatokkal (különben a több 10%-os variabilitás elfedi a néhány százalékos keresett hatást). 95%-nál magasabb valószínűségi szinten szignifikáns összefüggést találtunk a felületi ütésvizsgálati eredmények és az alternatív roncsolásmentes módszerként alkalmazott optikai mérési módszer eredményei között.



7. ábra: Mechanikai sérülés hatása, ütésvizsgálat

További lépésként kialakítottuk, illetve kifejlesztettük a terepi alkalmazáshoz szükséges további hardver-elemeket:

- alternatív akkumulátoros tápellátás a rendszer-elemekhez
- jelkondicionáló interfész az érzékelők és a mérőbemenetek illesztéséhez
- speciális külső (USB) audió-tartományú mérőinterfész Notebook-üzemhez
- a mérés kiértékelése mellett vezérlési funkciókat is ellátó komplex mérőszoftver.

A következő kutatási szakaszban (2005) elvégzett feladatok:

- Rendszerbe állítottuk a dinamikus állománymérési módszerek terepi alkalmazáshoz szükséges hardver- és szoftver-eszközöket. A Notebook-alapú akkumulátoros hordozható mérőrendszert alkalmassá tettük terepi rutinvizsgálatokra.
- A hordozható mérőrendszerrel a laboratóriumi vizsgálatok mellett in-vivo vizsgálatokat végeztünk számos kertészeti terményen.

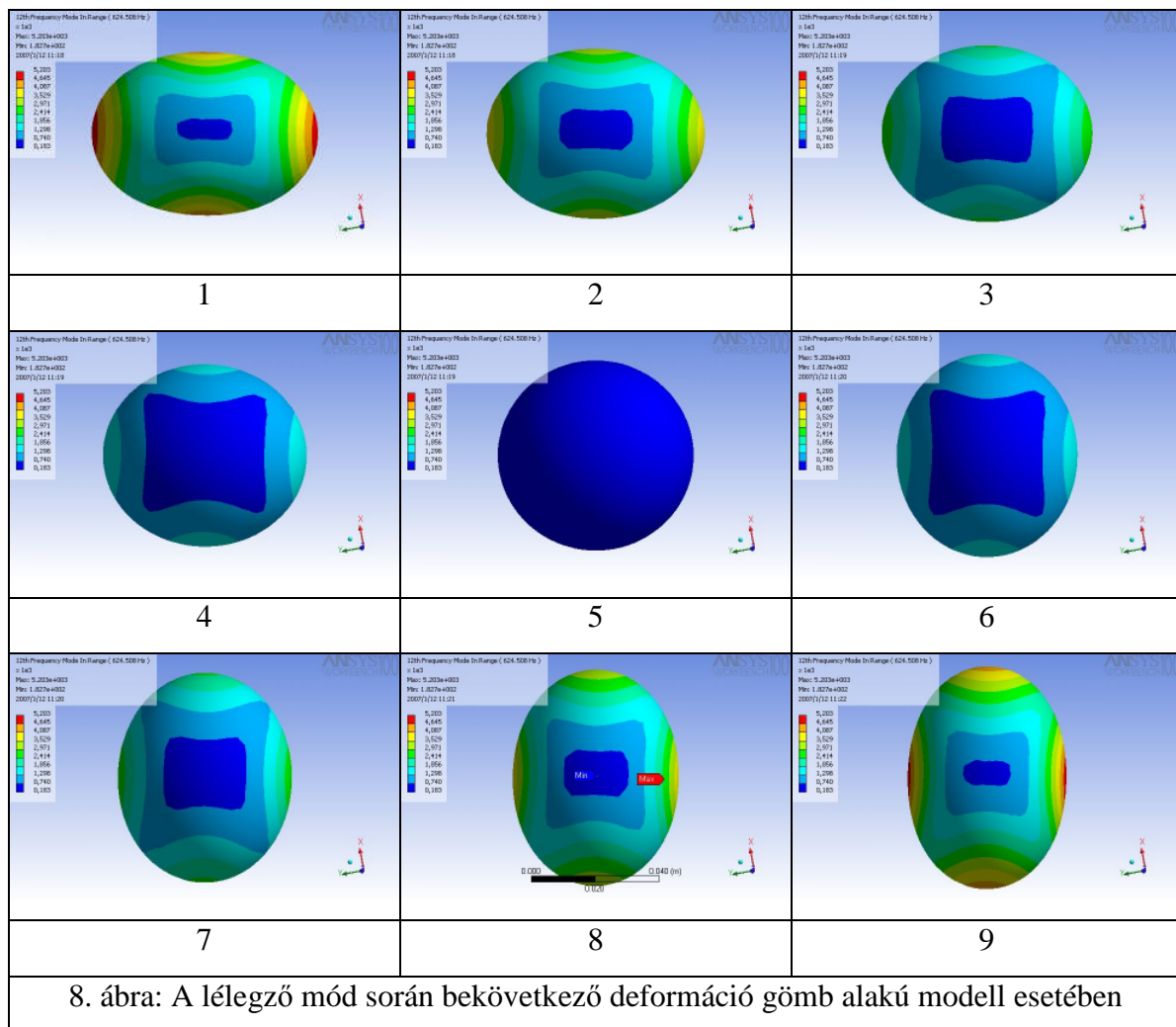
Az elvégzett vizsgálatok fajoként meglehetősen eltérő tapasztalatokat eredményeztek.

Általában elmondható, hogy az ütésvizsgálati módszer eredményesen alkalmazható a száron szabadon függő termések in-vivo vizsgálatára alaktól és keménységtartománytól függetlenül, azzal a megszorítással, hogy – főleg a kis tömegű minták esetén - a stabil alátámasztás hiánya további bizonytalansági tényezőként rontja a módszer – egyébként sem kiemelkedően jó – reprodukálhatóságát. A probléma elkerüléséhez szükség lehet a mérési elrendezés kisebb módosítására.

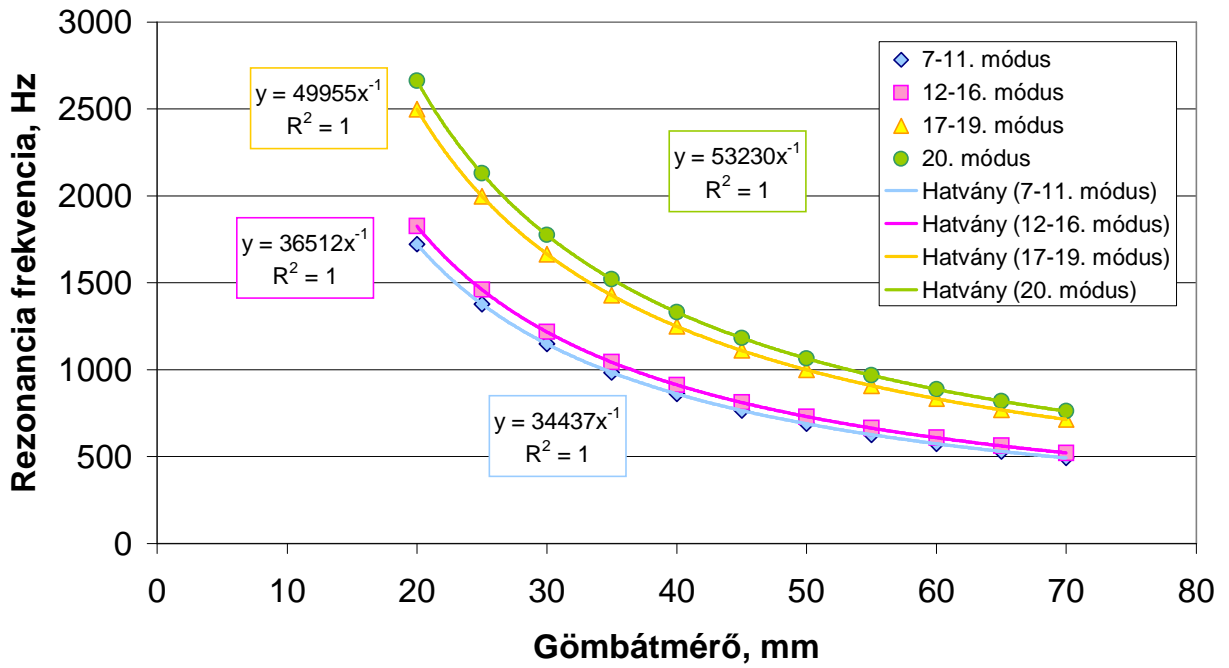
Ezzel szemben az akusztikus hangválasz-módszer in-vivo alkalmazása lényegesen több problémát vetett fel. Az akusztikus gerjesztés limitált energiaszintje miatt (éppen az adott projekt előző szakaszában határoztuk meg az egyes terményekre roncsolás-mentesen alkalmazható ütési impulzusok nagyságát) a hangválasz energiaszintje éppen a környezeti zaj energiaszintjének nagyságrendjébe esik. Ezért az előzőekben kifejlesztett mérési technika lényeges részét képező nyitott hangterű detektálás igen problematikus. Logikusan a keményebb gyümölcsű fajokra (pl. alma) a módszer változtatás nélkül alkalmazható, közepes keménységű terményekre (pl. őszibarack) a módszer a reprodukálhatóság jelentős csökkenésével alkalmazható, míg pl. paradicsom in-vivo vizsgálatára az adott rendszert nem tudtuk eredményesen alkalmazni. Ezekben az esetekben lényegesen megváltoztatott mérési elrendezés és módszer kidolgozására van szükség a célok elérése érdekében.

A mérési elrendezés és módszer változtatása érdekében elvégeztük, illetve folyamatosan végezzük a különböző felfüggesztési, gerjesztési, illetve detektálási pozíciók vizsgálatát végelelemes módszer alkalmazásával. Elvégeztük az alátámasztott és a száron függő termény

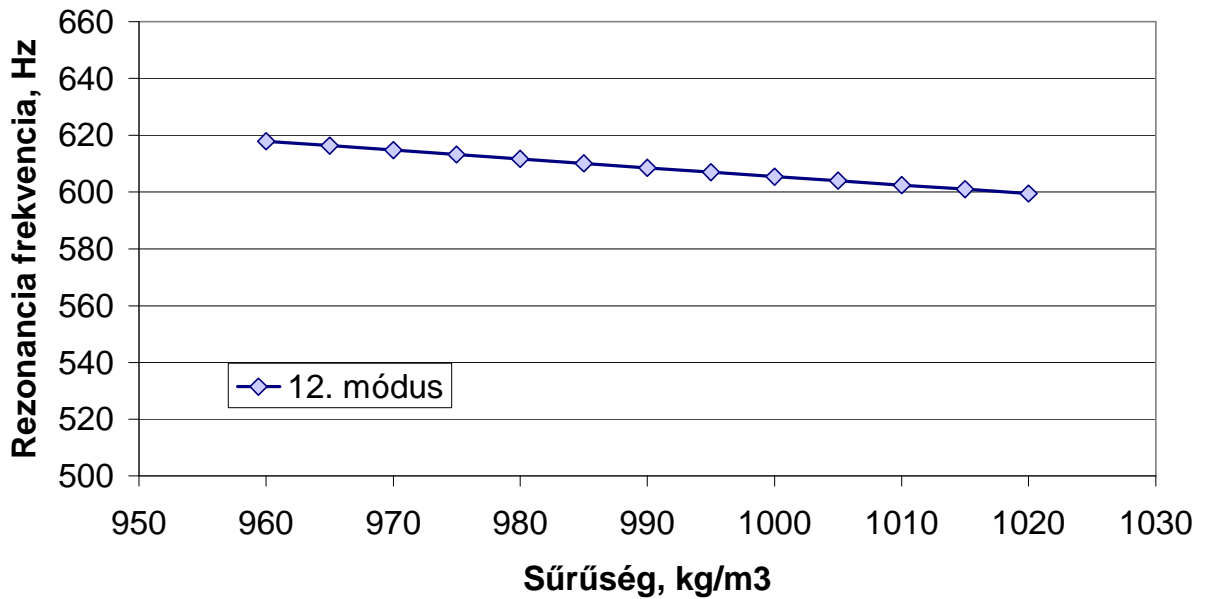
sajátrezgéseinek összehasonlító vizsgálatát, a kialakuló rezgési módusok sajátfrekvenciáinak összehasonlítását (8. ábra). A létrejövő rezgési módok közül a lélegző vagy gömb módot vizsgáltuk.



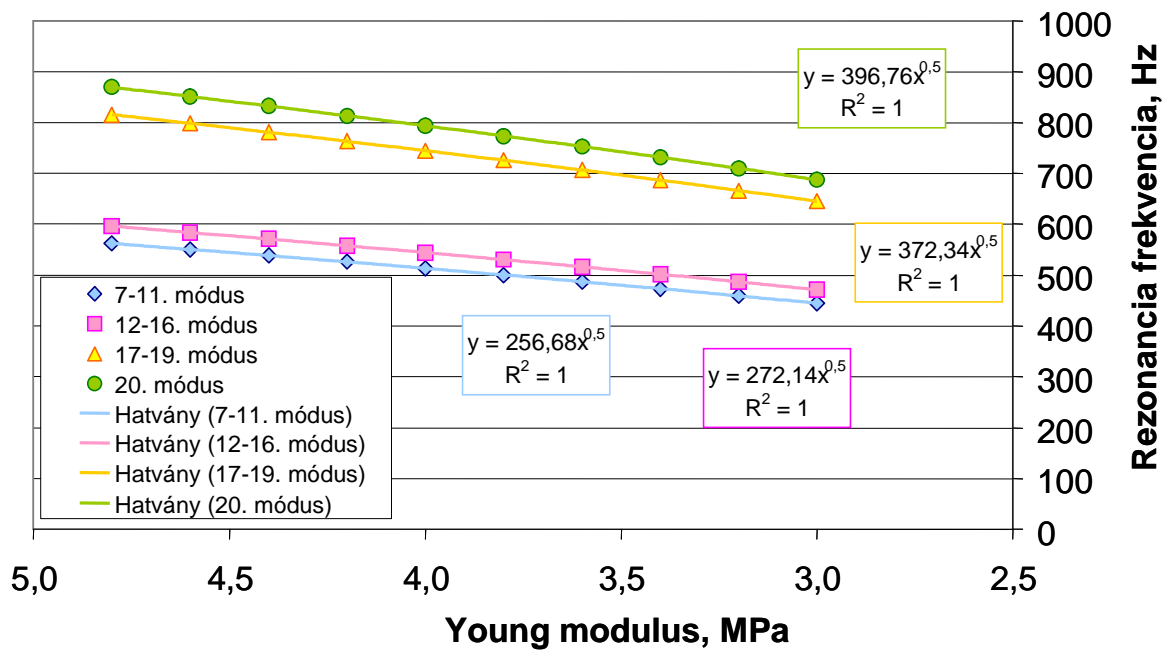
A végeleemes modellezés segítségével elemeztük az in-vivo körülmények között is legegyszerűbben gerjeszthető és detektálható rezgésmódus rezonancia-frekvenciájának függését a modellparaméterektől, nevezetesen a mérettől (9. ábra), a sűrűségtől (10. ábra) és a Young-modulustól, mint keménységjellemzőtől (11. ábra). Az eredmények alapján gömbszerű termény in-vivo akusztikus vizsgálatára az  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$  és az  $S_3 = f^2 \cdot d^2$  akusztikus keménységtényezőket találtuk alkalmasnak.



9. ábra: A gömb alakú test rezonancia frekvenciájának változása a szimulált növekedés során



10. ábra: A rezonancia frekvencia változása a sűrűség függvényében



11. ábra: A rezonancia frekvencia változása a modell Young-modulusa függvényében

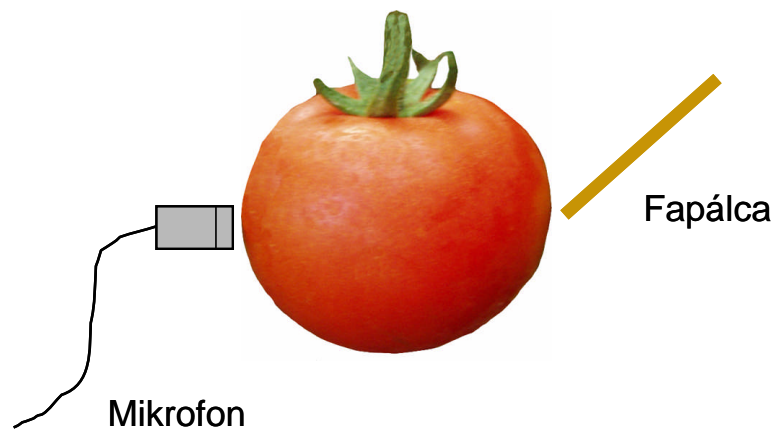
A munkát a továbbiakban – részben az új mérési elrendezések, módszerek bevezetésével – a munkaterv szerinti terepi in-vivo kísérletekkel folytattuk. Ezen belül a továbbiakban a paradicsom és az alma-körte vizsgálatok eredményeire térek ki.

Fóliasátorban termesztett paradicsomon (3 fajta: Preciza, Boderine és ..... ) vizsgáltuk az egyedi, azonosított bogyók akusztikus tulajdonságait a fejlődés, érés során (12. ábra). A vizsgálat során követtük néhány kiválasztott fürt valamennyi bogyójának méret- és rezonancia-frekvencia változását egy minimális méret elérésétől – a detektálhatóság, jel/zaj viszony alapján ez a vizsgált fajtákra kb. 20 mm – a szedési érettség eléréséig (esetenként a pultontartás során is). Az előkísérletek és modellezés eredményeként szerzett tapasztalatok alapján kiválasztott mérési elrendezést a 13. ábra mutatja (gerjesztés oldalirányból egy alkalmas pálcával, detektálás az átellenes ponton, a minta közelébe helyezett (de ahhoz hozzá nem érő), kismértékben irányított karakterisztikájú mikrofonnal. Az adott elrendezésben a hangválasz viszonylag zajmentes, a rezonancia-frekvencia jól detektálható (14. ábra).

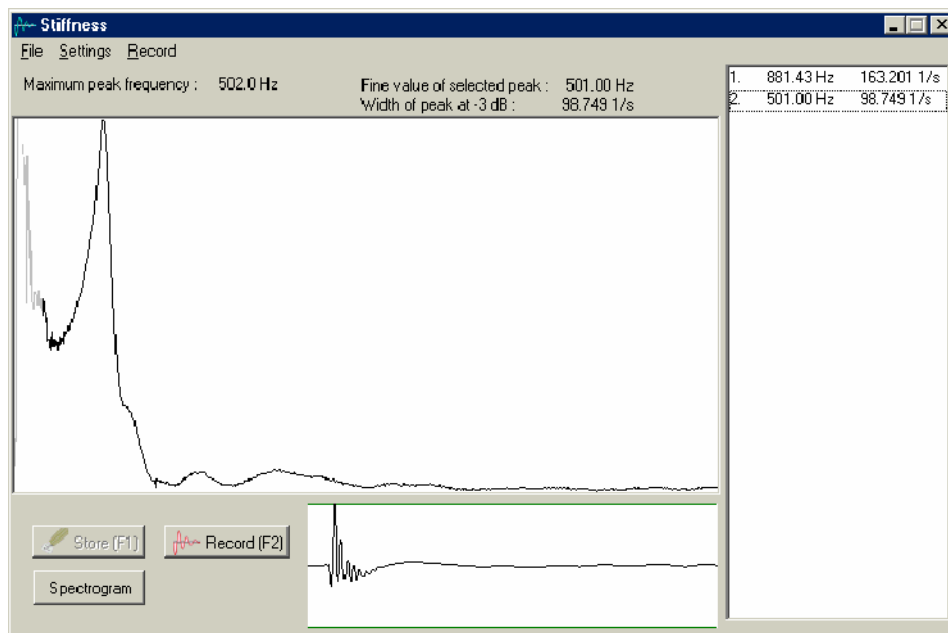




12. ábra: Az in-vivo paradicsomvizsgálatok körülményei

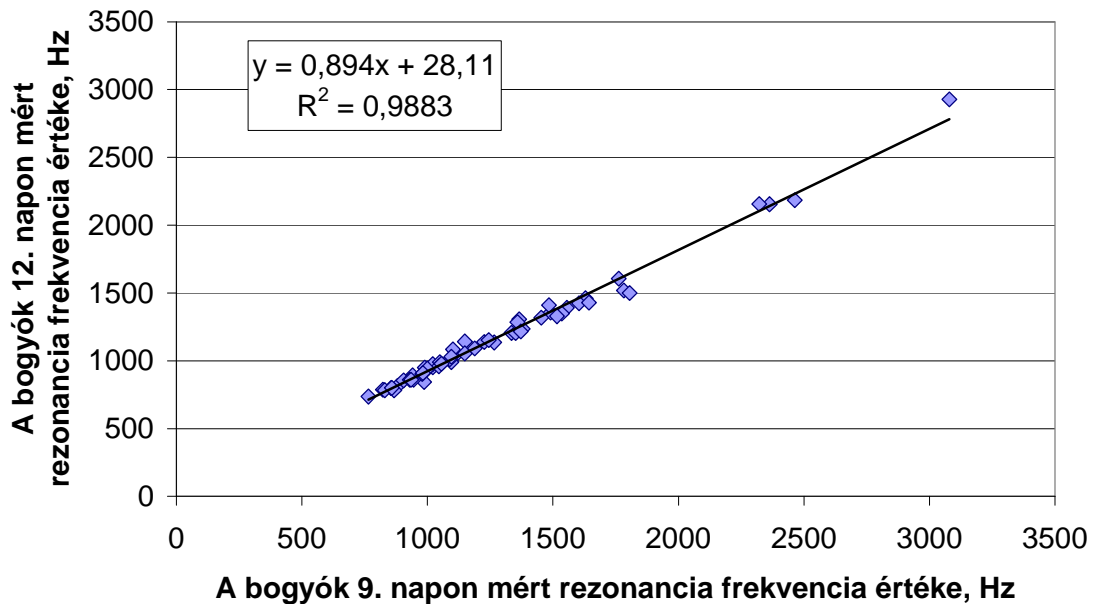


13. ábra: Mérési elrendezés a paradicsom növényen történő mérésére



14. ábra: A növényen vizsgált paradicsom akusztikus válasza

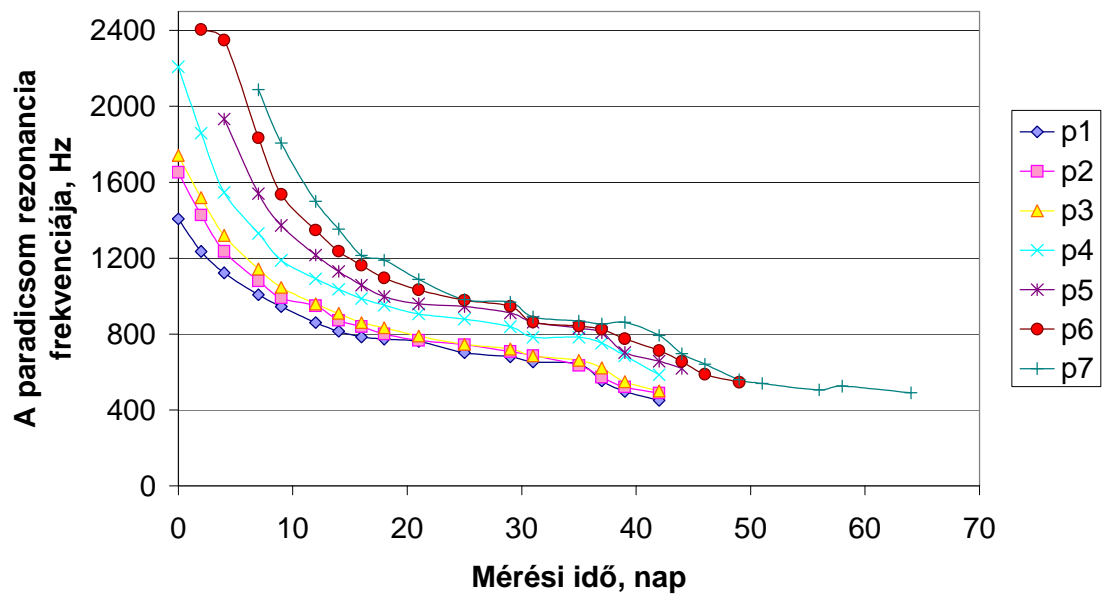
A mérést az érési időszakban (40-60 nap) 2-3 naponta végeztük azonos napszakban. A vizsgálat reprodukálhatóságát jól szemlélteti a 15. ábra, amely két egymást követő mérési alkalom eredményeit hasonlítja össze. A determinációs együttható (0,988) szerint a vizsgálati eredmények meghatározottsága igen magas, a véletlen hibák szerepe szinte kizárható, tehát a módszer valóban jól alkalmazható a tényleges változások követésére.



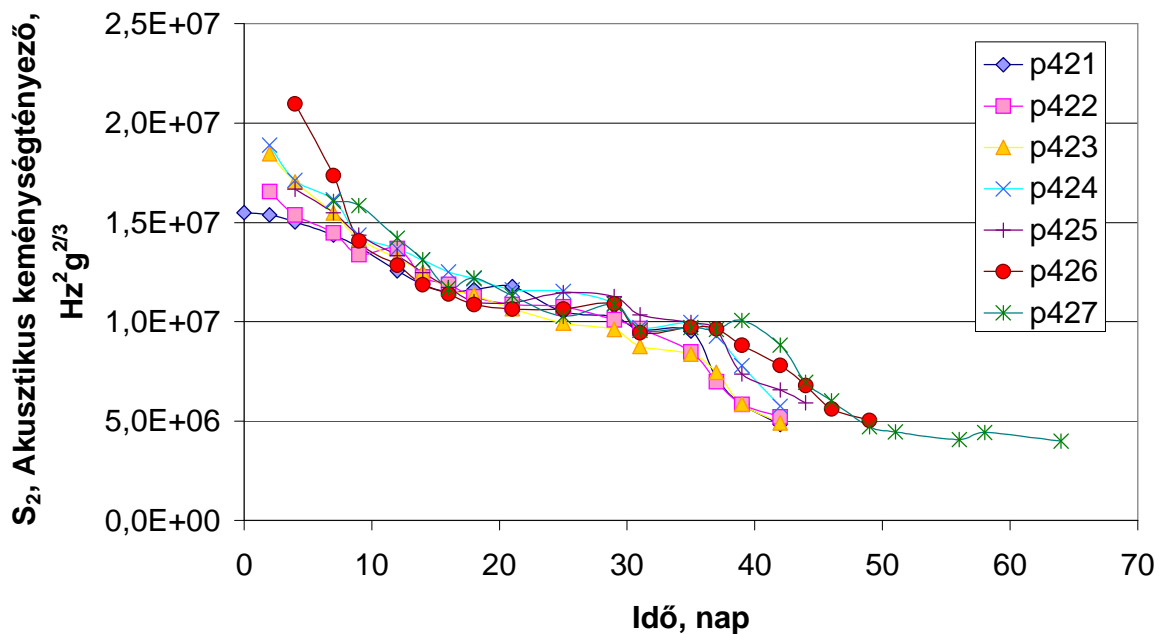
15. ábra: A paradicsombogyók egymást követő mérési napok során kapott rezonancia frekvencia értékei közötti összefüggés

A mért rezonanciafrekvenciák változását szemlélteti a 16. ábra a Boderine fajta egy fürtjének bogyóira. A kiváló reprodukálhatóságnak köszönhetően jól követhetők és modellezhetőek a fejlődés egyes szakaszai. A keménység a mért adatokból átmérőméréssel ( $S_3$ ), illetve a bogyó 3 nagytengelyének mérésével, ellipszoid alak és konstans sűrűség feltételezésével ( $S_2$ ) becsülhető. A keménységjellemzés gyenge pontja ebben az esetben sajátos módon a méret-meghatározás (mind az egyszeri mérés százalékos pontossága, mind a reprodukálhatóság messze elmarad a hangvázalás frekvenciamérésének metrológiai jellemzőitől). Ennek ellenére a keménységtényezők is jól követik a bogyók fejlődési folyamatát (17. ábra). A 18. ábra ugyanezt a folyamatot szemlélteti az egyes bogyók színváltozási szakaszainak (zöld, narancs, piros) feltüntetésével. Jól megfigyelhető, hogy a puhulás során jelentkező hirtelen meredekség-növekedés minden egyednél a zöld/narancs átmenet időpontjához köthető. A 19. ábrán néhány bogyó teljes pre-harvest/post-harvest mechanikai változása követhető nyomon.

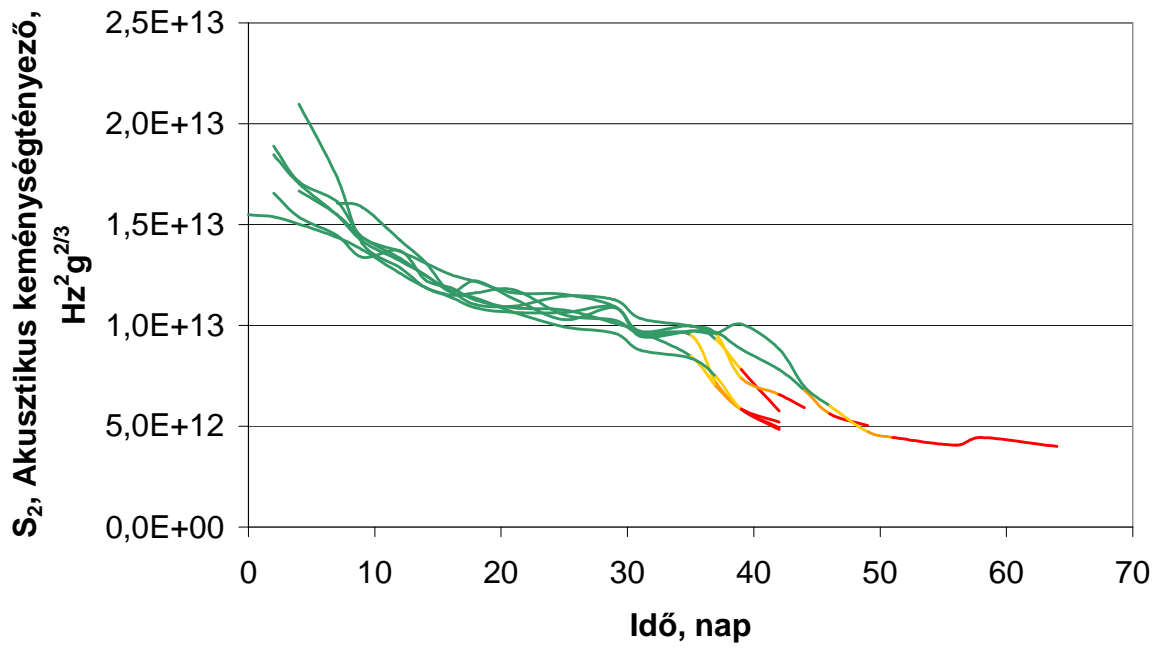
Az összes adat részletes értékelése után az eredményeket nemzetközi konferencián (GreenSys2007, Nápoly – kiküldött abstract) és referált folyóiratban készülünk publikálni.



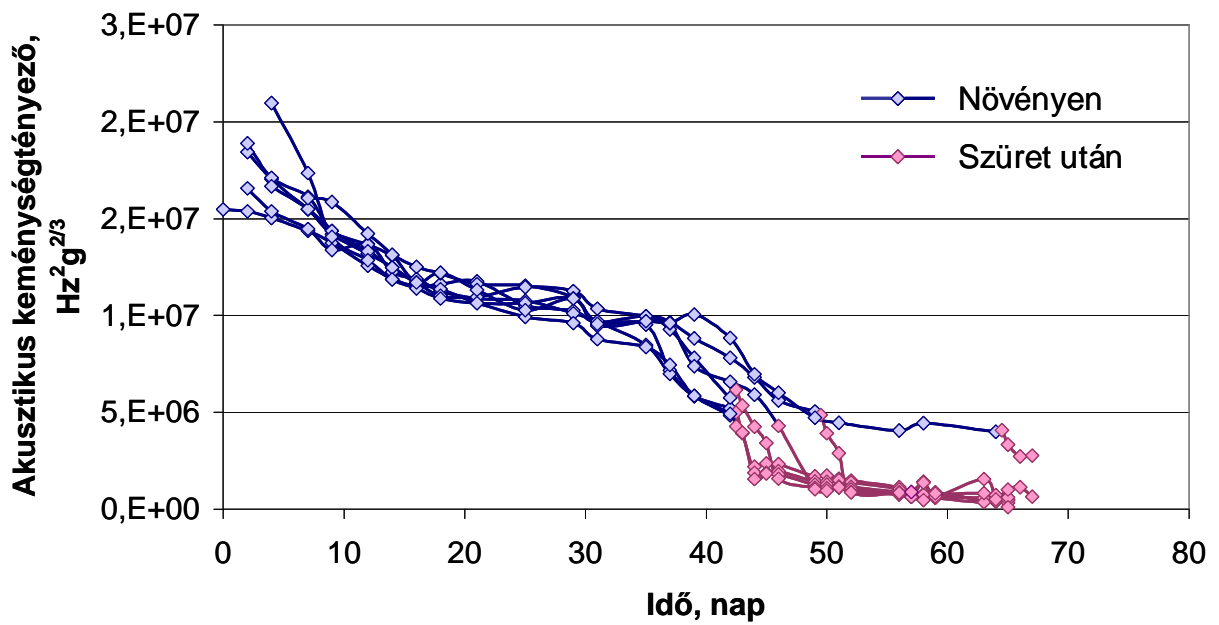
16. ábra: Egy fűrtön lévő paradicsombogyók rezonancia frekvenciáinak változása az idő függvényében (Boderine fajta)



17. ábra: A paradicsombogyó akusztikus keménységtényezőjének ( $S_2$ ) változása a fejlődési-érési folyamat során



18. ábra: Egy fűtőn lévő paradicsomok puhulása és színváltozása az idő előrehaladtával ( $S_2$ )



19. ábra: Egy fűtőn lévő paradicsombogyó keménységváltozása fejlődés, érés és pultontartás során

Szabadszíri körülmények között vizsgáltuk két körtefajta (Clapp kedveltje és Vilmos) és két almafajta (Starking és Idared) mechanikai jellemzőinek változását a fejlődési, érési folyamat során. A vizsgált gyümölcsök valamennyi, azonosított példányán (fajtánként 12-22 db) mértük az akusztikus hangválasz rezonancia-frekvenciáját, valamint a gyümölcs méreteit. Az akusztikus vizsgálatot 2006. augusztus 6-tól naponta (mindig azonos napszakban: este 6 és 7 óra között) végeztük a teljes érésig (24-30 nap), egyes esetekben a gyümölcs spontán leválásáig. Egy héttig (08/08/2006 – 16/08/2006) mind a reggeli (8 óra), mind az esti állapotot rögzítettük, illetve – csökkentett mintaszámmal – végeztünk vizsgálatokat egy-egy nap folyamán, kétóránkénti mérésekkel is a napi keménységváltozás követésére. A vizsgálat teljes időtartama alatt félóránként rögzítettük a környezeti hőmérséklet és a relatív páratartalom értékeit is a kísérlet helyszínén elhelyezett adatgyűjtővel.

Clapp



Vilmos



Starking



Idared



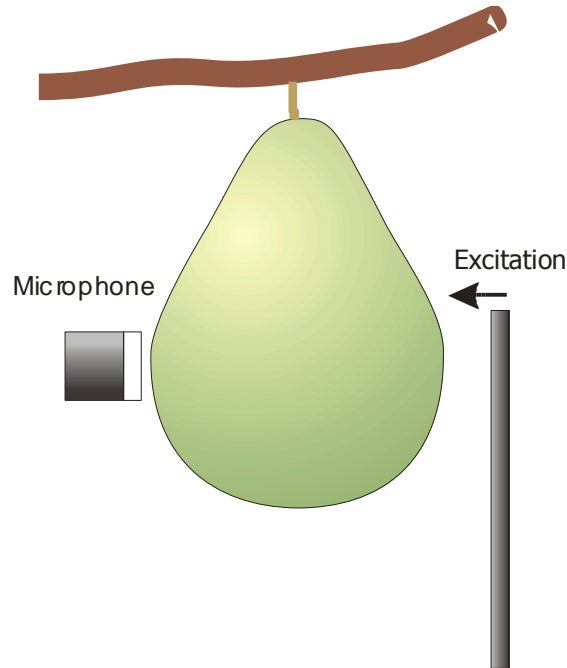
20. ábra: Az in-vivo vizsgált fajták

A mérési elrendezés az előzetes kísérletek tapasztalatainak és a végeselemes modellezés eredményeinek alapján a 21. ábra szerinti (oldalirányú gerjesztés, átellenes ponton történő érzékelés).

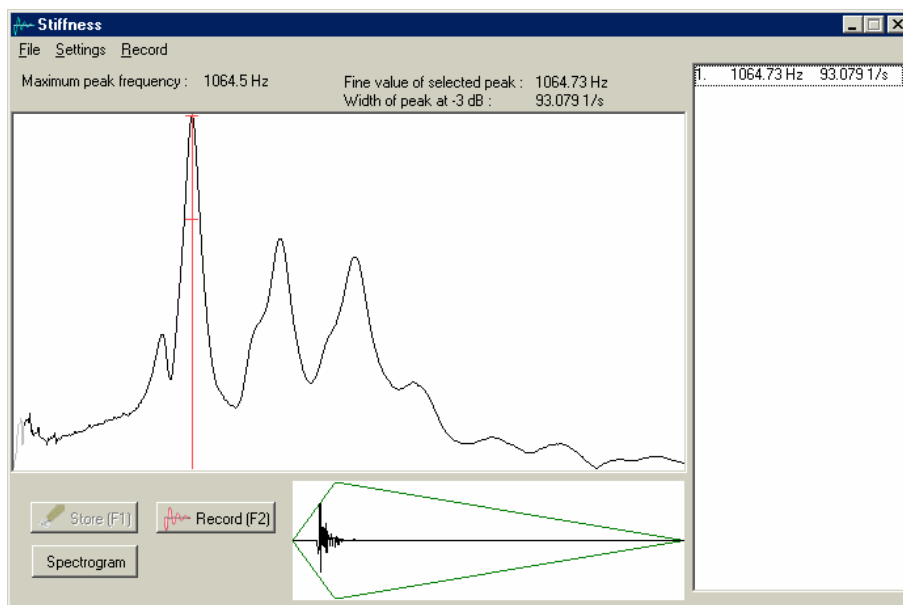
Mint korábbi publikációinkban (Felföldi et. Al., 2004, Felföldi and Muha, 2005) is rámutattunk, ebben az elrendezésben az

$$s = f^2 \cdot d^2, \quad \text{m}^2/\text{s}^2$$

paraméter a mechanikai hullámok terjedési sebességéhez, és így az állományhoz is leginkább köthető akusztikus keménységtényező.



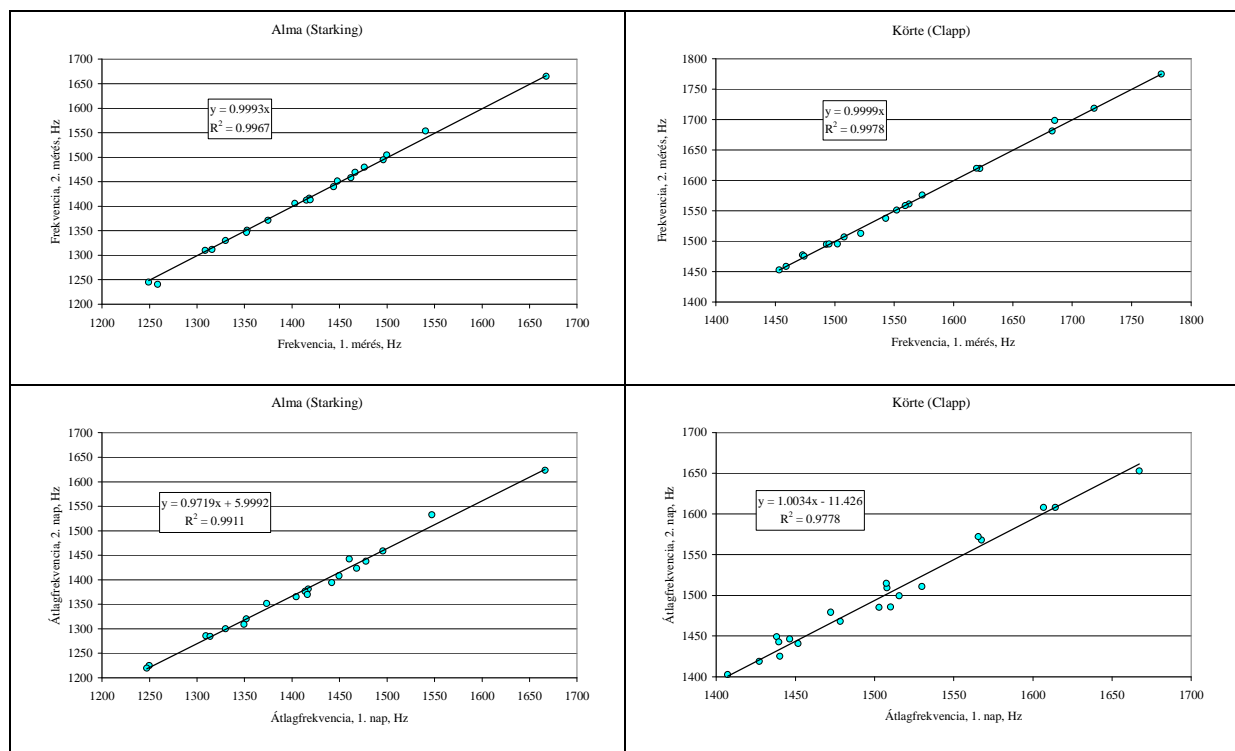
21. ábra: In-vivo alkalmazható akusztikus mérési elrendezés körtére



22. ábra: Jellemző körte hangválasz spektrum

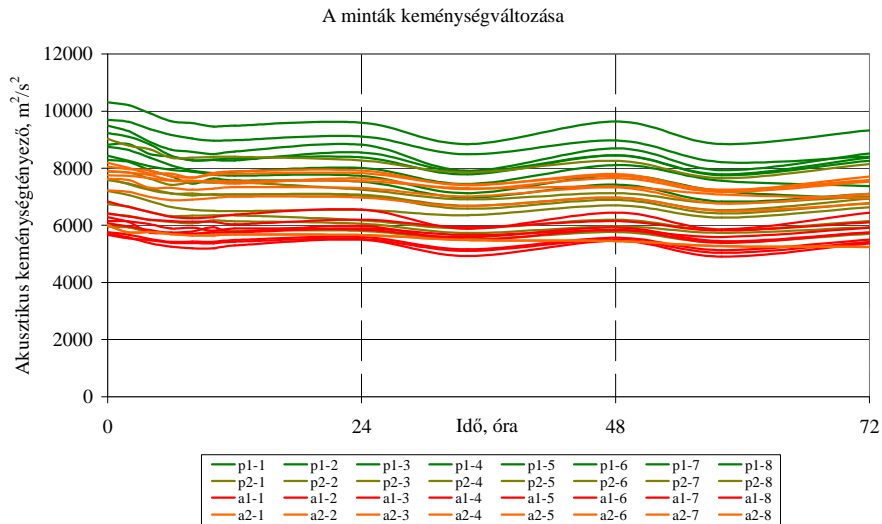
Az elrendezés terepi körülmények között is jól detektálható hangválaszt eredményez, melyből a rezonancia-frekvencia a mérőprogramban alkalmazott Fast Fourier Transform eljárással egyértelműen meghatározza a vizsgált módushoz tartozó rezonancia-frekvenciát (22. ábra).

A módszer ismétlődőképességét jól jellemzi az azonnal, illetve 1 nap után azonos terményeken megismételt mérések eredményeinek összehasonlítása (23. ábra).

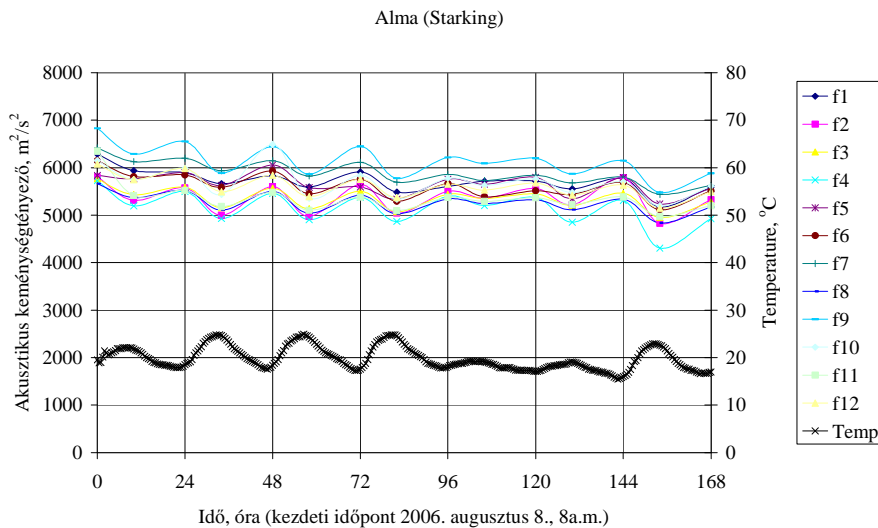


23. ábra: Az akusztikus mérés reprodukálhatósága: azonnal, illetve 1 nap után megismételt mérések eredményének összehasonlítása alma, illetve körtemintákon

A minták in-vivo vizsgálata alapján egyértelműen kimutatható azok napi keménység-ingadozása (24. ábra). A reggeli és esti keménység közötti különbség jól ismert jelenség, de ennek szignifikáns (95% valószínűségi szint) bizonyítása csak az itt alkalmazott, igen nagy reprodukálhatóságú és in-vivo alkalmazható módszerrel volt elérhető. Ez az ingadozás nyilván a napi hőmérséklet- és páratartalom-ingadozással hozható összefüggésbe, amint az a 25. ábrán is jól látható (a meleg, száraz nappali puhulást a viszonylag hűvös és nedves éjszaka során visszakeményedés, turgor-növekedés követi).



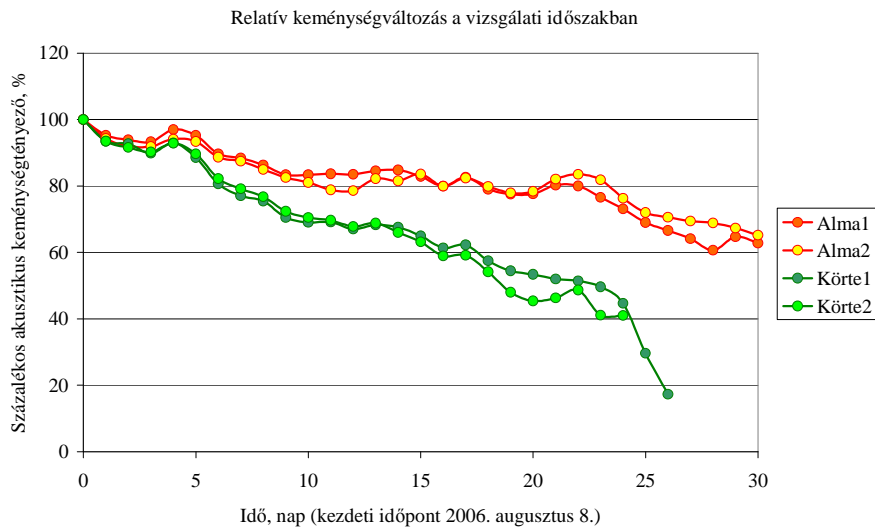
24. ábra: Alma- és körteminták napi keménységingadozása



25. ábra: A napi keménységingadozás és a napi hőmérsékletingadozás összehasonlítása

A módszert alkalmasnak találtuk az érésment követésére (26. ábra), a fajok és fajták közötti különbségek objektív jellemzésére, és – a regisztrált hőmérséklet és relatív páratartalom értékekkel együtt – egy olyan szakértői rendszer alapját képezheti, amely alkalmas a vizsgált fajták érésmentének előrejelzésére, az optimális szedési időpont objektív meghatározására.





26. ábra: A vizsgált gyümölcsök átlagkeménységének változása az érési olyamat során

**Irodalom:**

Felföldi J., V. Muha and G. Tóta (2004) Finite Element Method for Validation of Interpretation of Sample Vibrations – 6th International Conference on Food Physics and Dairy Sciences, Pécs, 2004: 27-28.

Felföldi J. and V. Muha (2005) Finite Element Method for Interpretation of Sample Vibrations – ASAE Annual Meeting Paper, Tampa, No. 056174, pp. 1-11.