

Projekt záró beszámoló

Cím: „Biológiai anyagok agrofizikai paramétereinek kimérése és hőfizikai modellezése” c. OTKA 69014 (2007-2011) pályázat

A pályázat összefoglalása

A pályázat munkatervében előirányzott várható eredmények, nevezetesen, az, hogy a mérési eredmények „az eddig használt véges elemes modellek teljes reformját jelenthetik, mivel az összetett rendszerekben végbemenő állapotváltozásokat korrekt, valós folyamatokként írják le”, megvalósultak. Ezek a mérések (idézve a pályázatból):” teljesen újszerűek, mivel ezt a mérési módszert majdnem kizárólag csak a talajtani kutatások során használták. Az időközben jelentkezett nehézségek okai, erre voltak visszavezethetők. Nevezetesen, a mért biológiai anyagok másként viselkedtek a vizsgálati módszereknél megszokott talajoktól: mikrobiológiai bomlási folyamatok indultak el a több napos (sőt hetes) mérés során a kezeletlenül hagyott anyagokban (1. ábra). Hosszú időbe, konzultációkba ill. próbamérésekbe tellett, amíg megfelelő fertőtlenítési módszert dolgoztunk ki, úgy, hogy az anyagok főbb tulajdonságai mégse változzanak.



1. ábra: A vízkötési potenciál meghatározó un. pressure plate extraktor (bal oldal), a mérések után a kezeletlen minta anyagokban fellépő bomlási folyamatok (jobb oldal)

A pályázat során egy ízben történt külföldi tanulmányút, 2010 őszén, amelyet konferencián való részvétellel is összekötöttünk. Ebben az esetben a modellek pontosságának, ill. jóságának ellenőrzése történt a világ vezető mágneses rezonancia imaging gyártó cég (BRUKER GmbH) tesztlaboratóriumában, Rheinstettenben (2. ábra).



2. ábra. A BRUKER cég Rheinstetteni tesztlaboratóriumában

A pályázat által nyújtott anyagi támogatást kihasználva sikerült ezt a teljesen alapkutató jellegű mérésorozatot és ennek eredményeire alapozott véges elemes modellezési munkát elvégezni. Eredményeink publikálása, intenzíven azonban még csak ezután következhet, az eddigi elsősorban konferencia megmérettetések után, jelenleg is több inaktív faktoros folyóirat cikk készül ill. került benyújtásra. Ezen kívül, a pályázat további sikere, hogy az elért eredményekre (mind elméleti, mind pedig labor mérés technikai) támaszkodva Európai Unió pályázatok beadására is sor kerülhet, ill. sor fog kerülni a kutatások folytatása céljából.

Részletes eredmények

A meglévő matematikai modellek átdolgozása

A korszerű hő- és anyagáram modelleket A.V. Luikov (1961) „óta” tartjuk számon. A leegyszerűsített alageyenlet rendszer az egyidejű hő- és anyagátvitel leírására a következő:

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = \text{div} D \cdot \text{grad} X \quad (1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div} k \cdot \text{grad} T + L \rho \frac{\partial X}{\partial T} \quad (2)$$

ahol: X a termék nedvességtartalma adott pontban (kg/kg száraz tömeg); τ az idő (s); D a diffúziós tényező (m^2/s); ρ a sűrűség (kg/m^3); c a fajhő ($\text{J}/\text{kg}, \text{K}$); T az abszolút hőmérséklet (K); k a hővezetési tényező ($\text{W}/\text{m}, \text{K}$) és L a latens hő (J/kg).

Az egyenletrendszer a konvektív szárítási műveletet írja le. Más hőközlési változatnál (sugárzás, mikrohullám) az egyenlet természetesen módosul. Az egyenletrendszerhez meg kell adni a kezdeti- és a peremfeltételeket. Ugyanakkor ez az egyenletrendszer a biológiai anyag (szemtermés) összetevőinek eltérő tulajdonságait nem veszi figyelembe (Sitkei: szóbeli közlés). Vagyis, „ha hagyjuk”, akkor az adott környezeti jellemzők mellett a modell minden alkotórészre

azonos nedvességtartalomig számol; nem veszi figyelembe az alkotórészek eltérő vízkötési potenciálját.

A fenti probléma megoldására a (2) egyenlet a következőképpen módosul):

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial X}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \dots \quad (3)$$

vagyis

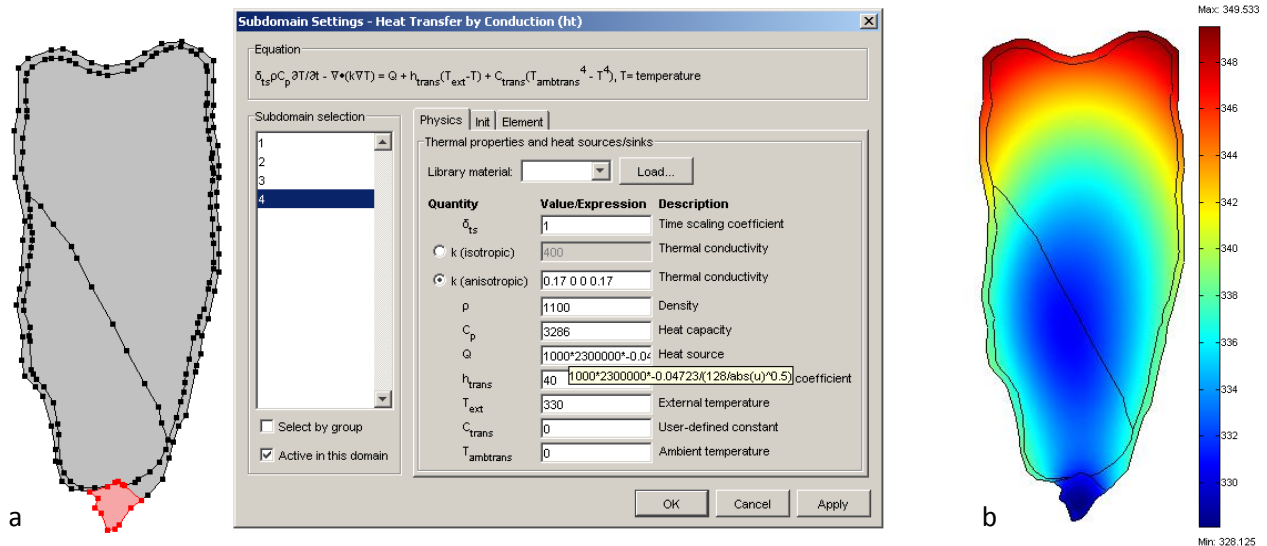
$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = \text{div} K \cdot \text{grad} \psi \quad (4)$$

ahol: ψ a kapilláris (vízkötési) potenciál (J/kg); a K pedig a hidraulikus vezetőképesség (m/s). A vízkötési potenciál a hőmérséklet és a nedvességtartalom függvényében ($\psi = f(X, T)$) a szorpciós izotermák alapján meghatározható:

$$\psi = -\frac{RT}{m_v} \cdot \ln \varphi \quad (5)$$

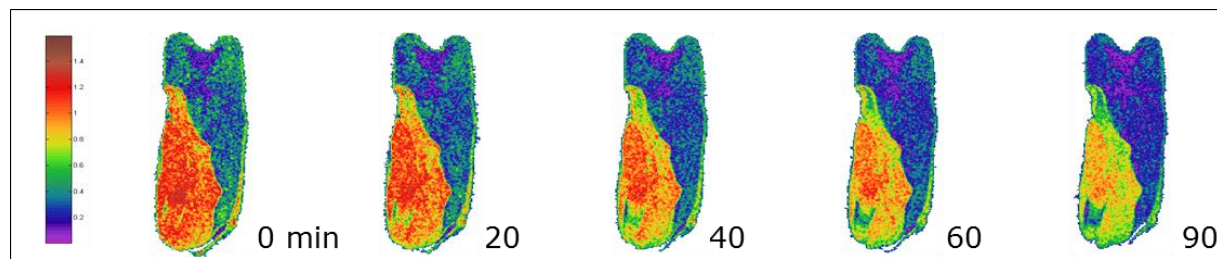
ahol: R az univerzális gázállandó (8,3143 J/K,mol); m_v a vízgőz molekula tömege (18,016 g/mol) és φ a levegő relatív páratartalma.

A programot a pályázat során megvásárolt COMSOL végeelem program MULTIPHYSICS moduljával futtattuk (3. ábra).



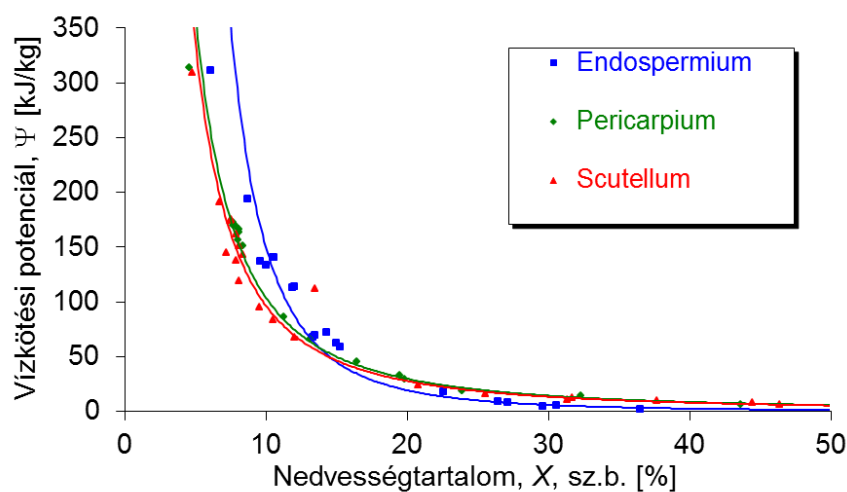
3. ábra: A kukoricaszem száradásának modellje a COMSOL végeelemes programban. A kukoricaszem geometriai modellje (pirossal a magköldök jelölve), ill. a hőtranszport egyenlet magadása (Q jelöli a párolgásból származó hőt) (a). A kukoricaszem keresztmetszetén számolt hőmérséklet eloszlása a száradás során (b)

A 3. ábra jól érzékelteti, hogy a csíra (scutellum) és a szemtermés csúcsa (köldök) közelében a legintenzívebb a nedvességleadás. Ez a jelenség a bevezetőben említett németországi MRI vizsgálatoknál igazolódott (4. ábra).



4. ábra: Mágneses rezonanciás felvételek egy kukoricaszem száradása közben (szárítási paraméterek 50 °C, 1 m/s).

Ezekben a modellezésekbe építettük be a különböző kukoricaszem alkotórészek vízkötési potenciál méréseinek eredményeit (5. ábra). A grafikonon, 14% nedvességtartalomnál egyértelműen látszódik, hogy az endospermium vízkötési potenciál értékei keresztezik a másik két alkotórész értékeit. Ez magyarázatul szolgál az irodalomban fellelhető – eddig ellentmondásosnak tűnt – adatokkal, a kukoricaszem alkotórészek száradási tulajdonságainak különbözőségére is.



5. ábra. A kukoricaszem alkotórészeinek vízkötési potenciál értékei különböző kiindulási nedvességtartalom függvényében (mérési pontok és a rájuk illesztett függvény)

Infrakamerás vizsgálatok

A száradó kukoricaszemről készített infrakamerás felvételeket a 6. ábrán mutatjuk be. A hőképek készítése során a kamera detektorába a kukoricaszem mozgása miatt a szem ugyanazon felületéről eltérő beesési szögben érkezik a hősugárzás. A kamera mátrixdetektor rendszere révén ugyan kismértékben fel van készítve a nem tökéletesen merőleges érkező hősugárzás detektálására és pontos kiértékelésére, esetünkben ugyanakkor a kukoricaszem geometriájából

eredendően nagyobb a kamera lencséjére érkező beesési szög, mint amit a mátrixdetektor kezelni tudna.

A 6(a) ábra a kukorica csíra felöli oldala látható, majd a 6(b), (c) és (d) ábrákon a szem jobb oldala, a 6(e) képen a mag hátulja, majd a 6(f) és (g) képeken a tovább forgatott szem bal oldala illetve a 6(h) ábrán újra a szem csíra felöli része látható. Az ábrák alatti grafikonokon a vízszintes fehér vonal menti hőmérsékletértékek eloszlását tüntettük fel. A szárítólevegő a kukoricaszemhez képest baloldaltól áramlott, ennek következménye végig nyomon követhető az elforgatás során is. Ezt a hatást figyelembe vettük a kiértékelések során. Abban az esetben, ha a szem teljesen szemben van a kamerával (6(a) ábra) a csíra részen hőmérsékletcsökkenést figyelhetünk meg, ami a szem szélén mért értékekhez képest 6 °C-os különbséget is mutat. A szem fordítása után, ugyanazon a hőmérsékleti vonalon haladva azon a ponton, ahol a szemközi képen 72,2 °C-ot mértünk (csíra, 6(a) kép), a 6(b) képen a hőmérséklet már 74,2 °C. Hasonló tendencia játszódik le a szem forgatása során. Az egymást követő képeken a kukoricaszem ugyanazon képpontjához tartozó hőmérsékleti értékeket hasonlítottuk össze. Az eredményeket a 1. táblázatban rögzítettük.

1. táblázat: A 6. ábra egymást követő képeinek azonos pontjain mért eltérő hőmérsékleti értékek a forgatás során

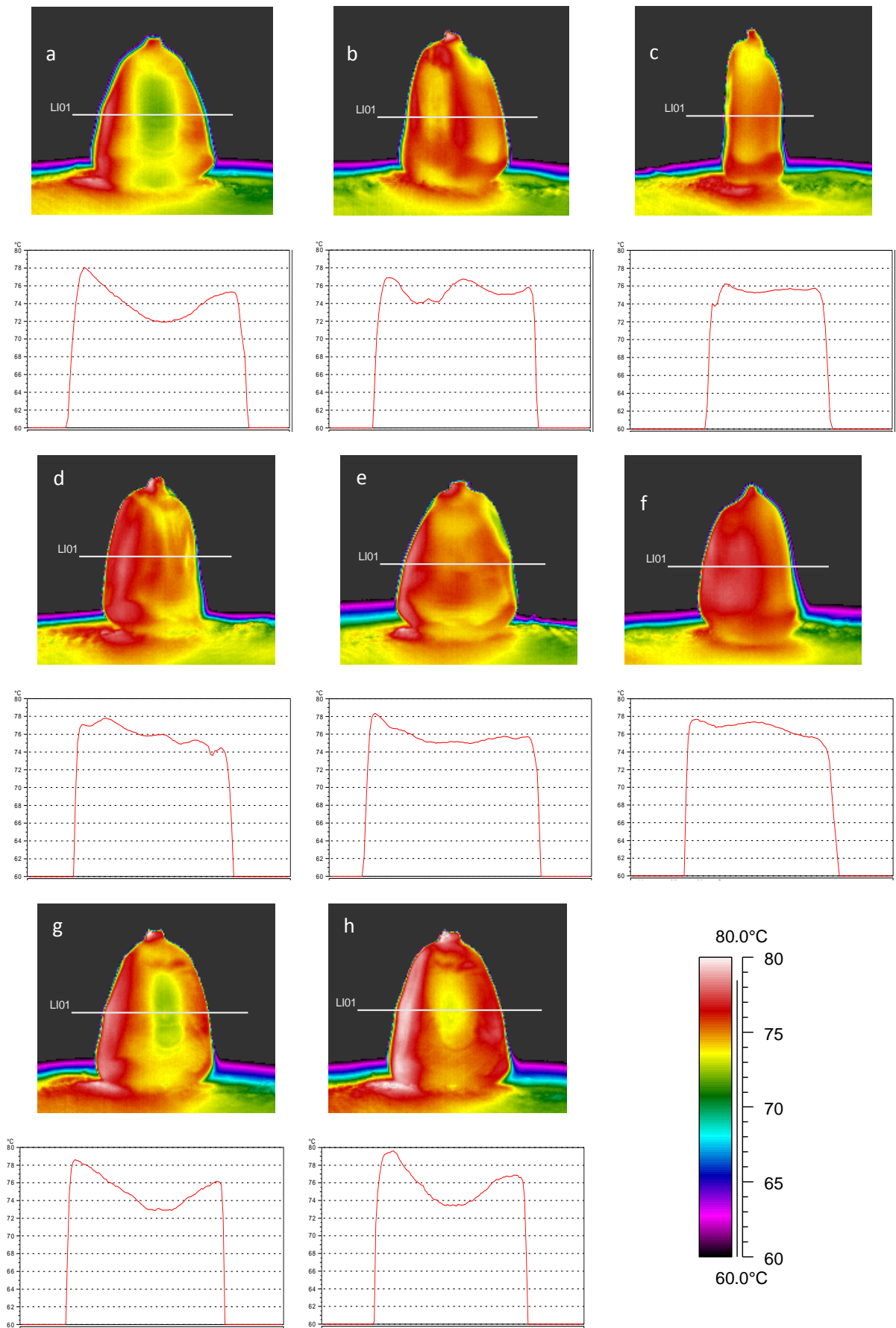
(a): 72,2 °C	(b): 74,2 °C
(b): 75,0 °C	(c): 75,4 °C
(c): 75,5 °C	(d): 77,8 °C
(d): 75,2 °C	(e): 75,4 °C
(e): 75,4 °C	(f): 77,2 °C
(g): 72,7 °C	(h): 74,3 °C

A kapott eredmények alapján látható, hogy a beesési szög, illetve a kamera által vizsgált tárgy helyzete befolyásolhatja a hőképek megbízhatóságát.

Az fenti infrakamerás felvételeket (technikai okokból) a szárítás során készítettük, amikor a kukoricaszem köldök része már kiszáradt állapotban van; míg a modell készítésekor a szárítás kezdetekor fennálló állapotot vettük alapul. A mérési eredményeinket a továbbiakban összehasonlítottuk a FEMLAB modellel hőtranszfer részével. A korábbi futtatásokhoz képest változtatásokat, ill. pontosításokat kellett végrehajtani a végeselemes modell kiinduló paramétereiben. A korábbi modellben – mivel elsősorban a nedvességtartalomra fókuszáltunk - nem vettük figyelembe a párolgásból eredő hőmérsékletváltozást, amelyet a hőtranszport differenciálegyenlet tartalmaz:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + L \rho \frac{\partial X}{\partial t} \quad (6)$$

ahol: ρ a sűrűség (kg/m³); c a fajhő (J/kgK); T a hőmérséklet (K); t az idő (s); k a hővezetési tényező (W/mK); L a párolgáshő (J/kg); X a nedvességtartalom (kg/kg); x és y irányok.



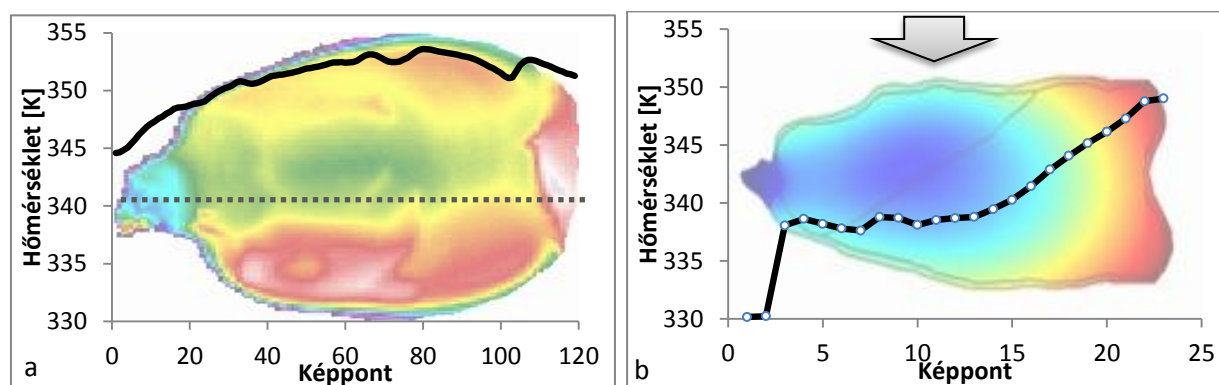
6. ábra: Kukoricaszemről készített infrakamerás felvételek, valamint adott keresztmetszeti hőmérséklet eloszlások; **(a) - (f):** eltérő elfordulások.

Mivel a nedvességleadás legintenzívebben a kukorica köldökön keresztül történik, ezért a modell geometriáját kiegészítettük ezzel a résszel, valamint itt vettük figyelembe a párolgásból eredő hőmérsékletcsökkenést (6(a) ábra). A nedvességtartalom változás a vizsgált kukoricaszem fajtájával végzett vékonyrétegű szárításból számolt nedvességleadási egyenletből határoztuk meg:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{-0.0338685}{X} \quad (7)$$

A 7. ábra a kukoricaszem keresztmetszetében számolt hőmérsékletet mutatja. A mag köldöknél egyértelműen látszik a párolgás miatti hőmérsékletesés, amely a két differenciálegyenlet (hő- és anyagtranszport) helyes egyidejű megoldására is utal.

Összehasonlítva a termokamera segítségével detektált és a modell által számolt a kukoricaszem csírközépvonalnál mért felületi hőmérséklet lefutásokat hasonló eredményeket kapunk (7. ábra).



7. ábra: Kukoricaszem száradás közbeni infrakamerával mért felületi hőmérsékletének (a) összehasonlítása a FEMLAB végeselemes programmal végzett modell hőmérsékleti értékeivel (b). (A hőmérséklet lefutási görbe helye az (a) ábrán a szaggatott vonal, a (b) ábrán a nyíllal jelzett él.)

Mindkét esetben a mag köldök a leghidegebb (legintenzívebb párolgás miatt), a csíra feletti rész még mindig hidegebb, mint az endospermiumnál lévő, ami a vékonyabb perikarpiummal is indokolható. Az látható eltérések adódhatnak a két mag eltérő geometriájából is (a korábban már meglévő modell nem a termokamarával vizsgált mag méreteivel készült).

Az infrakamerás felvételek – hasonlóképpen, mint a MRI mérések - hozzájárulnak a végeselemes modell továbbfejlesztéséhez, pontosításához, ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy – mint minden mérés esetében – a módszerek finomítása, kalibrálás pontosítása további kutatási témák lehetőségét igényli.