

# شبیه سازی عددی انتقال حرارت بسته های گندم جوانه زده با ابعاد استوانه ای در ماکروویو به روش المان محدود

محمدجواد حسین زاده<sup>1\*</sup>، امیر حسین الهامی راد<sup>2</sup>، محمدجواد کاظم زاده پارسا<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری تخصصی علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران

2- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران

3- دانشیار، گروه مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

تاریخ پذیرش: 1396/03/28

تاریخ دریافت: 1396/01/16

## چکیده

در این مطالعه گرمایش ماکروویو در اجسام جامد سه بعدی با هندسه‌ی استوانه‌ای به کمک روش عددی المان محدود توسط نرم افزار تجاری آباکوس تحلیل شد. در ابتدا برای صحت‌سنجی حل عددی نتایج حاصل با سایر منابع مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از حل عددی از تطابق خوبی با نتایج ارائه شده در دیگر منابع برخوردار بود. در این مطالعه بمنظور شناسایی بسته‌بندی مناسب جهت ارزیابی توزیع حرارت بطور یکنواخت در نمونه گندم جوانه‌زده با تحلیل المان محدود در بسته‌بندی استوانه ای با ابعادهای  $16 \times 32$ ،  $8 \times 16$ ،  $4 \times 8$ ،  $5 \times 10$ ،  $2 \times 4$  سانتیمتری که به ترتیب (طول  $\times$  شعاع R)، مدل سازی گردید. نتایج حاصل از مدل ها نشان داد استوانه با ابعاد  $4 \times 8$  هندسه مناسب تری برای آنزیم بری در بین بسته ها دارد. مدت زمان لازم در این ابعاد جهت رسیدن بیشترین حجم نمونه به دمای 80 درجه سانتیگراد که مناسب آنزیم‌بری است، 90 ثانیه تخمین زده شد. تاثیر شرایط حرارت-دهی پالسی و اثرات آن در بسته‌بندی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در مقایسه بین شرایط حرارت‌دهی پیوسته و ناپیوسته، نتایج نشان داد هر کدام از این دو حالت دارای مزایای خاص خود است. در حرارت‌دهی پیوسته مرکز نمونه دارای دمای بیشتر و توزیع دما از یکنواختی کمتری برخوردار است. این در حالی است که در حرارت‌دهی ناپیوسته دمای بیشینه مرکز نمونه کاهش یافته و یکنواختی بیشتری در توزیع دما مشاهده می‌شود.

**واژه های کلیدی:** المان محدود، فرآیند مواد غذایی، گرمایش ماکروویو، گندم جوانه زده، مدل سازی

## 1- مقدمه

فرآیندهای گرمایش ماکروویو در غذاها نیز، به کار می رود که علت آن انعطاف بالای آن در ساختارهای غیرمنظم و خواص موادی است که وابسته به دما و رطوبت هستند. به علاوه، المان محدود برای حل معادلات دیفرانسیلی جزئی مناسب بوده و می توان آن را برای شبیه سازی مسائل، در میدان های متعدد فیزیکی و مهندسی بکار برد (2). با عنایت به توضیحات فوق هدف از انجام این تحقیق این است که با استفاده از شبیه سازی المان محدود در آنزیم بری گندم جوانه زده و فناوری ماکروویو، پیش بینی و شبیه سازی آنزیم بری به بهترین نحو در بسته بندهای با ابعاد مشخص و در کوتاه ترین زمان با کمترین آسیب حرارتی به گندم جوانه زده میسر گردد. شبیه سازی به کاربران کمک می کند تا ضمن بررسی توزیع حرارت در بسته و مدل های مورد نظر از حرارت دهی بسیار بالا یا ناکافی برای فرآیندهای مواد غذایی جلوگیری کنند. این کار سبب می شود در مقیاس صنعتی در زمان انجام فرآیند منابع مفید ماده غذایی در حرارت بالا همانند چربی، فیبر، پلی فنل ها، آنتی اکسیدان ها، ویتامین ها، پروتئین ها و کربوهیدرات های مفید، که خصوصیات مطلوب یک محصول عملگراست محفوظ بماند. همچنین مدل سازی توانایی پیش بینی کوتاه بودن فرآیند از نظر زمان و حرارت در بسته بندی های مختلف را داشته و کاربران یا مسئول مربوط به کنترل کیفیت را بمنظور اعمال شرایط مطلوب آگاه نماید.

## 2- مواد و روش ها

به منظور شبیه سازی عددی از نرم افزار آباکوس (Abaqus/cae 6.14-2)، استفاده گردید.

## 2-1- محاسبات ریاضی

## 2-1-1- محاسبه انتقال حرارت

در سیستم استوانه ای انتقال انرژی حرارتی به شکل های متفاوت حجمی **2D** که در شکل 1 آورده شده برای مواد جامد خوراکی که در فشار ثابت و در حجم متفاوت هستند اولین و دومین رابطه انتقال انرژی حرارتی به صورت ذیل می توان نوشت.

گرمایش ماکروویو دارای کاربرد وسیعی در حوزه ی فرآوری غذا همچون پختن، خشک کردن، آنزیم بری، پاستوریزه کردن و حفظ مواد غذایی دارد. انتقال انرژی در فرآیندهای تولید غذا معمولاً توسط رسانش یا همرفت انجام می شود (1). در فرآوری ماکروویو غذاها، انرژی مستقیماً به نمونه منتقل شده و این امر گرمایش حجمی ایجاد می کند (2). راه حل های متعددی برای غلبه بر توزیع دمائی غیریکنواخت در زمان گرمایش ماکروویو مواد غذایی، پیشنهاد شده است (3). رفع توزیع دمائی غیریکنواخت و نقاط بسیار داغ در زمان گرمایش ماکروویو یکی از اصول ضروری برای این نوع حرارت دهی است. انرژی ماکروویو در سطح ملکولی بوسیله ی اصطکاک ملکولی ایجاد می شود تا دوران دو قطبی حلال های قطبی صورت گیرد. نوسان دو قطبی ناشی از تغییرات میدان الکتریکی و مغناطیسی فرآورده است. این مشخصه بسیار اساسی است، چرا که آب به عنوان جزء اصلی مواد غذایی، دارای ماهیت دو قطبی است (4). در مسئله ی گرمایش ماکروویو مواد غذایی جامد، پدیده مربوط به گرمایش ماکروویو توسط بسیاری از محققان مدل سازی شده است. مدل سازی های انجام شده در این زمینه به کمک دو دیدگاه متفاوت صورت گرفته است تا اثرات توزیع میدان الکترومغناطیسی لحاظ گردد. دیدگاه اول معادلات ماکسول و دیدگاه دوم قانون لامبرت می باشد (5، 3). قانون لامبرت یک راه کار ساده جهت توان جذب شده ارائه می کند (7، 6). مطابق نتایج ارائه شده در تحقیقات، می توان از آن برای شبیه سازی توزیع دما برای نمونه غذاهای ضخیم استفاده کرد. اندازه نمونه هایی که قانون لامبرت برای آنها آستانه تعیین می کند، در استوانه ها بیشتر از ورقه ها است (5). قانون لامبرت به خوبی برای استوانه ها فرمول بندی شده است و توصیف گر توان هایی است که در محور مرکزی منطبق بر مشاهدات تجربی تمرکز داشته اند (7، 6). در بین تکنیک های عددی متعدد موجود در مطالعات شبیه سازی شده، دو روش عمدتاً برای مدل کردن انتقال گرما وجود دارد: روش تفاضل محدود و روش المان محدود (FEM). المان محدود کاربردهای متعددی در علوم و مهندسی دارد و برای حل

$$(6)$$

$$q_{1,z} = Q_s \frac{\partial}{\partial z} e^{-2a \frac{R-r}{2} - z} - e^{-2a \frac{R-r}{2} + z} \frac{\partial}{\partial z} \dot{u}$$

که Z و r به ترتیب فاصله مبدا محوری و شعاعی فاصله است

$$Q_s = \frac{Q_0}{2pR(R+L)}$$

تابعی از قدرت ماکروویو بر روی سطح مواد و

$$a = \frac{2p}{l_0} \sqrt{\frac{\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} \dot{u} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \dot{u} \right) - \frac{1}{b} \ddot{u} \right]}{2}}$$

ضریب نفوذ یا ضریب میرایی<sup>2</sup> از رابطه مربوط به  $\alpha$  محاسبه می شود و عملکرد دی الکتریک<sup>3</sup> و فاکتور کاهش دی الکتریک<sup>4</sup> با فرض بر اینکه متناسب با قدرت یا توان ماکروویو باشد. جایگزینی انتقال حرارت و امواج صانع شده و همچنین تغییرات امواج در فضای درونی ماکروویو از محاسبه رابطه (2) به رابطه ذیل خواهیم رسید:

$$r C_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + Q_s 2a \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( e^{-2a(R-r)} \right) - e^{-2a(R+r)} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( e^{-2a \frac{R-r}{2} - z} - e^{-2a \frac{R-r}{2} + z} \right) \frac{\partial \dot{u}}{\partial z}$$

در شرایط نخست مواد غذایی فرض می شود دما و زمان به شکل ذیل برای

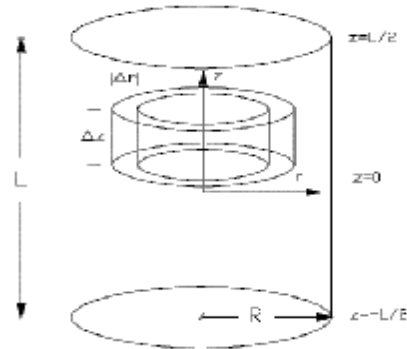
$$t = 0, \quad T = T_0 \quad " \quad r \quad " \quad z$$

در زمانیکه شرایط مرزی برای تقارن محوری  $r=0$  است، برابر:

$$(1)$$

$$2pD \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + (2pD) \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = (2pD) \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + (2pD) \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right]$$

این رابطه در محدوده  $\Delta z > 0$  و  $\Delta r > 0$  نتیجه ذیل را می دهد



شکل 1- شمای محوری یک مدل در ماده غذایی به شکل استوانه

$$r C_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

در این رابطه T دما،  $\rho$  دانسیته،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $q_{k,z}$  و  $q_{k,r}$  هدایت گرمای انتقالی محفظه<sup>1</sup> در راستای Z و r که توسط قانون فوریه و  $q_{k,z}$  و  $q_{k,r}$  اشعه مربوط به هیت فلاکس در راستای Z و r براساس قانون لامبرت می باشد. روابط مربوط به حجم درونی ماکروویو به صورت معادلات ذیل بیان می شود:

$$q_{k,r} = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4)$$

$$q_{k,z} = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

در جایی که k ضریب انتقال حرارت به روش هدایت باشد

$$q_{1,r} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) Q_s \left[ e^{-2a(R-r)} - e^{-2a(R+r)} \right]$$

## 2-2- فرضیات مطالعه

فرضیات مربوط به این مطالعه به شرح ذیل می باشد:

از انتقال جرم در ماده صرف نظر می شود، 2- مسئله به صورت زمان مند شبیه سازی می شود، 3- شدت تولید حرارت داخلی به صورت تابعی از مکان در نظر گرفته می شود، 4- ماده غذایی به شکل یک استوانه و بسته بندی شده، یکپارچه و همگن فرض می شود، 5- ماده مورد استفاده در بسته بندی ماده غذایی هیچگونه جذب اشعه ماکروویو ندارد، 6- خواص دی الکتریک ماده غذایی مستقل از دما است، 7- خواص ماده غذایی مانند ضریب انتقال حرارت، گرمای ویژه و دانسیته مستقل از دما است، 8- خواص الکترومغناطیسی گندم جوانه زده و گندم معمولی یکسان در نظر گرفته می شود

2-3- صحت سنجی<sup>3</sup>

بمنظور بررسی مدل مورد نظر با سایر مدل سازی های انجام گرفته، ابتدا داده های مربوط به یک نمونه مورد مطالعه قرار گرفته را با مدل استخراج شده از نرم افزار مورد آزمون قرار گرفت. سپس داده های استخراج شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. اطلاعات مربوط به مطالعه انجام گرفته در خصوص ماده غذایی (سیب زمینی) به شرح ذیل تحلیل شد:

1- مدل سازی هندسی دامنه مسئله مورد نظر، 2- انتخاب المان مناسب و شبکه بندی ناحیه هندسی مسئله، 3- تعریف خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی ماده مورد نظر با توجه به نوع تحلیل، 4- اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه، 5- انتخاب تحلیل مورد نظر و انجام تنظیمات لازم، 6- انجام تحلیل توسط هسته حلگر نرم افزار، 7- مشاهده نتایج و 8- بحث در نتایج. خصوصیات فیزیکی، الکترومغناطیسی و ترمودینامیکی سیب زمینی بمنظور صحت سنجی به شرح جدول 1 از منبع مورد نظر استخراج گردید.

(11)

$$-K \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad " z \quad " t > 0$$

همین طور بر روی  $z=0$ 

(12)

$$-K \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{z=0} = 0 \quad " r \quad " t > 0$$

از آنجائیکه کاهش دما، در نتیجه جابجایی حرارت خارجی و تبخیر رطوبت پیشنهاد می شود در شرایط مرزی بیرونی به این روش انجام آ شود:

(۱۳) الف

$$-K \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h_c (T - T_a) - \frac{r_{ev}}{A} DH_{ev} \quad " z \quad " t > 0$$

(۱۳) ب

$$-K \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L/2} = h_c (T - T_a) - \frac{r_{ev}}{A} DH_{ev} \quad " r \quad " t > 0$$

توضیح مربوط به تبخیر رطوبت و تحلیل شرایط مرزی نمونه توسط زاهو و همکاران (1995) مورد ارزیابی قرار گرفت. چنانچه از تبخیر رطوبت صرف نظر گردد، شرایط مرزی رابطه (13) الف و ب، به صورت ذیل تعریف می شود.

(۱۳) ج

$$-K \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h_c (T - T_a) \quad " z \quad " t > 0$$

(۱۳) د

$$-K \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L/2} = h_c (T - T_a) \quad " r \quad " t > 0$$

در رابطه (9) معادله به صورت دو براکت آورده می شود و معادله به صورت ذیل تعریف می شود (2):

(14)

$$Q(r, z) = Q_0 \left[ \frac{2a}{r} \int_0^R e^{-2a(R-r)} e^{-2a(R+r)} + \frac{2a}{z} \int_0^{L/2} e^{-2a(L-z)} e^{-2a(L+z)} \right] + \frac{2a}{r} \int_0^R e^{-2a(R-r)} e^{-2a(R+r)} + \frac{2a}{z} \int_0^{L/2} e^{-2a(L-z)} e^{-2a(L+z)}$$

روابط بالا توسط لین و همکاران در سال 1995 نیز، به اثبات رسیده است.

جدول 1- خصوصیات فیزیکی، الکترومغناطیسی و ترمودینامیکی سیب زمینی (8)

منبع	K	$c_p$	$\rho$	$\alpha [cm^{-1}]$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	نمونه
(2)	0.648 W/m <sup>0</sup> c	3/63 Kj/kg <sup>0</sup> c	1067 Kg/m <sup>3</sup>	0/44	58	13	سیب زمینی

و  $L=32$  cm بررسی گردید (2). حرارت دهی در ماکروویو با فرکانس 2/45 گیگاهرتز و توان 350 وات در زمان های 10، 20 و 30 ثانیه مدل سازی شد. در گام دوم این مطالعه با فرض بر اینکه خصوصیات گندم با یک گندم جوانه زده به شرح جدول 2 در شرایط محیطی یکسان و حجم ثابت، برابر باشد مدل سازی برای نمونه مذکور صورت گرفت.

شرایط مرزی یا ضریب انتقال حرارت جابجایی، بر اساس یافته های محققین و سایر مطالعات برای شبه سازی اجسامی که به شکل مکعب در نظر گرفته می شود به طور تقریبی 37/05 و برای اجسام استوانه ای 39/4 در نظر گرفته می شود (6). همچنین  $Q_0$  بطور تقریبی از رابطه ذیل محاسبه می شود:

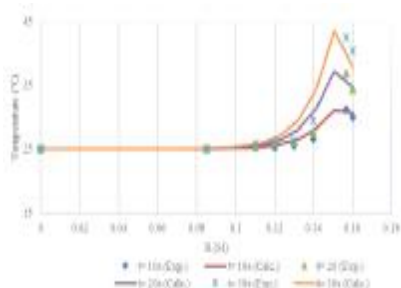
$$\times Ln (wt) (W = 59/8 + 453/2Q_0 =$$

در این مطالعه ارزیابی و صحت سنجی در ابعاد  $R=16$  cm

جدول 2- خصوصیات فیزیکی، ترمودینامیکی و الکترومغناطیسی گندم جوانه زده (9)

منبع	میزان مختصات	گندم جوانه زده
(10)	800Kg/m <sup>3</sup>	$\rho$ چگالی
(11)	0/14 W/m <sup>0</sup> c	K ضریب انتقال حرارت
(12)	1300Kj/kg <sup>0</sup> c	Cp ظرفیت گرمایی
(13)	2/89	$\epsilon'$ خواص دی الکتریک
(13)	0/35	$\epsilon''$ افت دی الکتریک
محاسبه شده در این مطالعه	0/053cm <sup>-1</sup>	$\alpha$ ضریب میرایی یا نفوذ

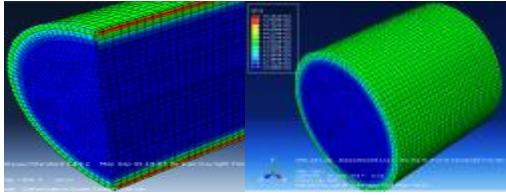
میزان همبستگی حاصل از شبه سازی توسط نرم افزار آباکوس در ماده غذایی سیب زمینی را نشان می دهد (شکل 2).



شکل 2- نمودارهای حاصل از تجزیه و تحلیل نمونه سیب زمینی در نرم افزار به منظور بررسی و صحت سنجی در زمان های 10، 20، 30 ثانیه

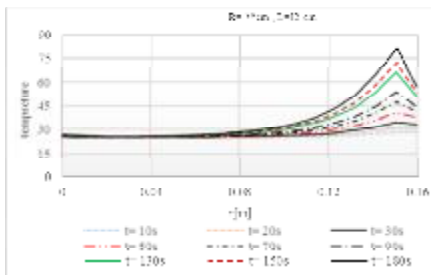
### 3- نتایج و بحث

قانون لامبرت براساس تحقیقات انجام گرفته توسط اولویرا و فرانس (2002) نباید برای اجسام و مواد غذایی با شعاع بسیار کوچک استفاده شود. طبقه بندی مواد غذایی توسط محققین پیشنهاد شده است (6، 7، 8). اما این اواخر نویسندگان نتایج متغیری براساس نتایج آزمایشگاهی به دست آورده اند. رومانو و همکاران (2005) پیشنهاد می کنند بررسی های بیشتری بر روی نتایج حاصل از نمونه مورد آزمون در شرایط آزمایشگاهی و شبه سازی انجام شود. بررسی ها نشان داد همبستگی بین نتایج حاصل از مطالعه انجام گرفته و شبه سازی به ترتیب برای زمان های 10، 20 و 30 ثانیه همبستگی 0/94، 0/93 و 0/91 را نشان می دهد. شکل 2

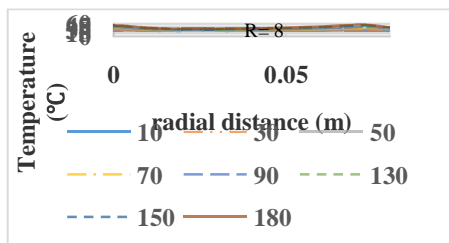


شکل 3- بررسی تحلیل انتقال حرارت در سیب زمینی مدل شده توسط نرم افزار بصورت سه بعدی در حالت الف) نمونه کامل و ب) برش داده شده

پس از صحت سنجی بر روی نمونه سیب زمینی ارزیابی ها بر روی نمونه گندم جوانه زده جهت بررسی توزیع حرارت در نمونه و انتخاب ابعاد مناسب از میان استوانه های  $16 \times 32$ ،  $16 \times 8$ ،  $8 \times 8$ ،  $8 \times 4$ ،  $5 \times 10$ ،  $4 \times 2$  سانتیمتری دارای مولفه های به ترتیب ((طول)  $L \times$  شعاع)  $R$ ) انجام گرفت و در شکل های 4 و 5 و 6 و 7 و 8 نحوه انتقال حرارت در هر بسته آورده شده است.



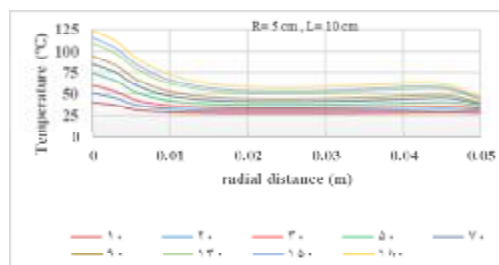
شکل 4- نمودار توزیع حرارت در گندم جوانه زده با استفاده از شبیه ساز آباکوس



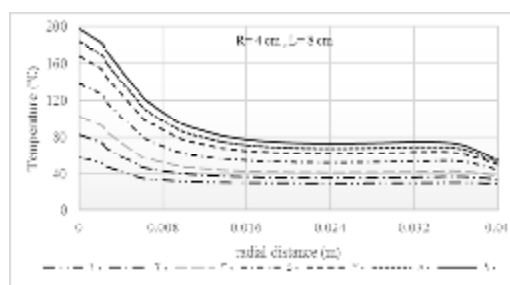
شکل 5- توزیع حرارت در گندم جوانه زده با استفاده از شبیه ساز آباکوس

معادله (14) یک معادله مشخص دارای مولفه شعاعی و محوری است. جزء محوری کاهش به عنوان یک تابع نمایشی در امتداد محور Z است. مولفه شعاعی دو مورد را سهم می شود، که یکی به عنوان تابع نمایشی از محور  $r$  به صورت کاهش و دیگری به عنوان یک تابع معکوس از فاصله شعاعی به صورت افزایشی است. برای رسم مولفه شعاعی از قدرت ماکروویو جذب در امتداد محور  $r$  است. نتایج حاصل از مطالعات رومانو و همکاران (2005) نشان داد با افزایش ابعاد استوانه میزان ماکزیمم دما، به سمت محور  $r=0$  حرکت می کند و در اطراف استوانه  $r=R$  دما در حد بیشینه است. همین طور مشخص گردید با افزایش ابعاد در راستای محور Z دما در سطح پوسته به طور فزاینده ای افزایش می یابد. با افزایش شعاع محوری نمونه میزان جذب اشعه ماکروویو در مرکز کاهش می یابد ولی در پوسته نمونه میزان حرارت افزایش می یابد (2). توزیع دما در نمونه های غذایی با سه کمیت ابعاد نمونه در ارتباط با عمق نفوذ ماکروویو، شرایط اولیه و مرزی همچنین شکل یا هندسه نمونه (2). بنابراین جهت ارزیابی و بررسی عمق نفوذ امواج و رابطه آن با ابعاد مختلف بسته بندی استوانه های با ابعاد مختلف شبیه سازی شد. استفاده از مدل سازی و پیش بینی توزیع حرارت در مقیاس صنعتی به ما کمک می کند علاوه بر پیش بینی های مربوط به انتقال حرارت در نمونه به طراحی فرآیند و دستگاه های مورد نیاز توجه بیشتری شود و ضمن دقت بالاتر در انجام کار هزینه های مربوط به آزمون ها را نیز کاهش داد. شکل 3 تحلیل انتقال حرارت در سیب زمینی مدل سازی شده بصورت سه بعدی را نشان می دهد.

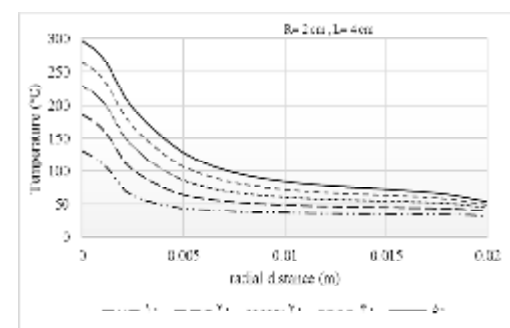
نمونه غذایی گندم جوانه زده جهت آنزیم‌بری نمونه که بر اساس استاندارد میزان آنزیم‌بری در جوانه گندم 80 درجه سانتیگراد است (15). در میان مدل‌های ارائه شده ابعاد  $4 \times 8$  از توزیع حرارت مناسب‌تری جهت آنزیم‌بری برخوردار است و به مدت زمان حدود 90 ثانیه جهت توزیع حرارت در کل بسته‌بندی نیازمند است (شکل 7). نتایج حاصل از افزایش یک سانتیمتری نمونه در شعاع محوری و دو سانتیمتری ارتفاع نیز (ابعاد  $5 \times 10$ ) نشان داد با اندک تغییراتی در اندازه نمونه میزان عمق نفوذ حرارت در همه نقاط تحت تاثیر قرار می‌گیرد (شکل 6). نتایج نشان داد برای این میزان افزایش در ارتفاع و شعاع نمونه، میزان بیشتری حرارت و زمان نیاز است. نتایج حاصل از مدل‌سازی در بسته‌بندی با ابعاد  $4 \times 2$  نشان داد با کوچک تر شدن ابعاد بسته‌بندی عمق نفوذ حرارت در نمونه به شدت افزایش یافته و حرارت ابتدای بارگذاری نمونه به 120 درجه می‌رسد و این درحالیست که در سایر نقاط نمونه دما 50 درجه سانتیگراد است. افزایش زمان نیز تاثیری بر روی نمونه نداشته و نقطه مرکزی نمونه دمای بسیار زیادی جذب می‌کند (شکل 8). در مطالعات صورت گرفته توسط سایر محققین نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد (6). توزیع حرارت بصورت سه‌بعدی در بسته‌بندی‌های مختلف در شکل 9 آورده شده است. همانطور که در شکل‌های 4 و 5 مشاهده می‌گردد ابعاد بسته‌بندی  $32 \times 16$ ،  $16 \times 8$  با افزایش اندازه بسته‌بندی عمق نفوذ امواج کاهش پیدا کرده و حجم کوچکی از نمونه در دمای مناسب آنزیم‌بری قرار دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شکل 9 توزیع حرارت در این استوانه‌ها را بصورت سه بعدی نشان می‌دهد. به همین ترتیب با کوچک‌تر شدن ابعاد نیز به دلیل تجمع امواج در نقطه مرکزی نمونه دما به سرعت افزایش یافته و احتمال سوختگی در مرکز استوانه را بیشتر می‌کند. این در حالیست که سایر نقاط دمای پائین‌تر از حد مطلوب آنزیم‌بری دارد (شکل 9). مدل‌سازی ابعاد  $4 \times 8$  در میان استوانه‌های شبیه‌سازی شده نشان داد، با وجود تجمع امواج در مرکز سایر نقاط از یکنواختی بهتری در توزیع حرارت برخوردار است.



شکل 6- نتایج حاصل از توزیع حرارت در گندم جوانه زده با استفاده از شبیه ساز آباکوس

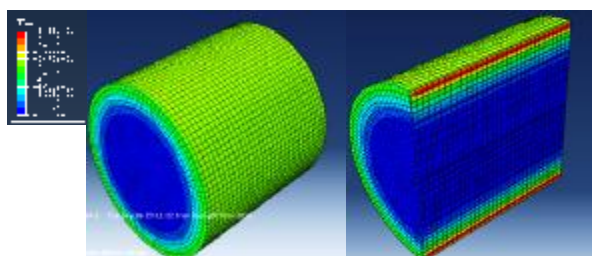


شکل 7- نحوه توزیع حرارت در گندم جوانه زده با استفاده از شبیه ساز آباکوس

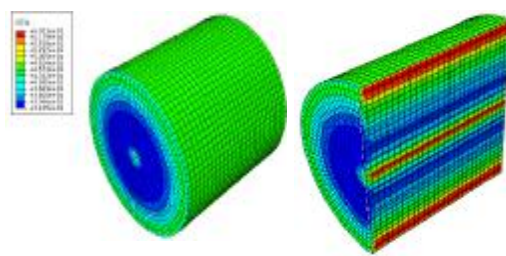


شکل 8- نتایج حاصل از توزیع حرارت در گندم جوانه زده با استفاده از شبیه ساز آباکوس

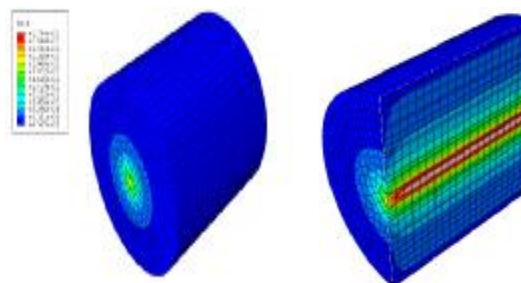
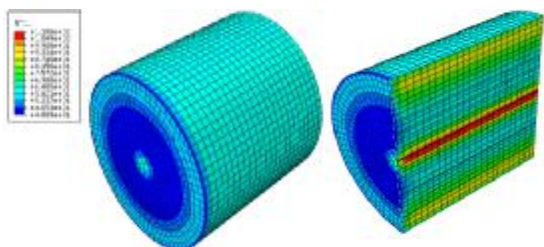
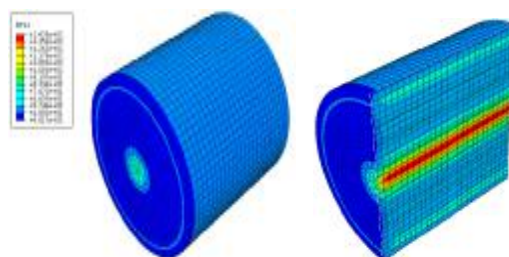
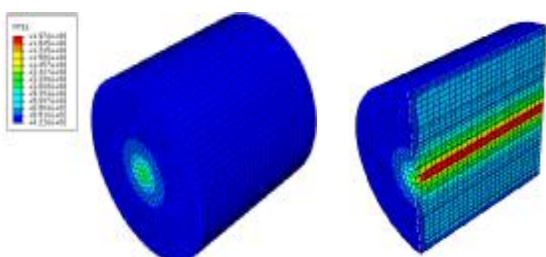
نتایج حاصل از مدل‌ها نشان داد نقش ابعاد در بسته بندی به هنگام حرارت‌دهی بسیار مهم و حائز اهمیت است. همانطور که از مدل‌سازی ابعاد مختلف مشخص گردید، با اندکی تغییرات در ابعاد بسته عمق نفوذ حرارت و نمودار انتقال حرارت بطور محسوسی تغییر خواهد کرد. لذا دقت در انتخاب بسته‌بندی مناسب جهت کاهش زمان حرارت‌دهی و یکنواختی انتقال حرارت در نمونه حائز اهمیت است. در



الف

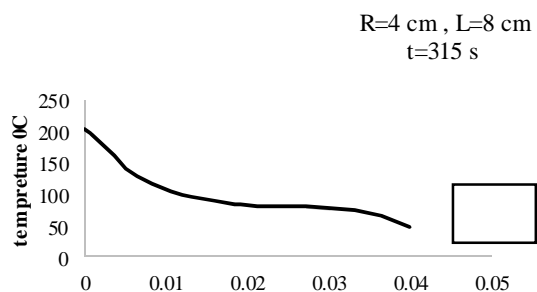
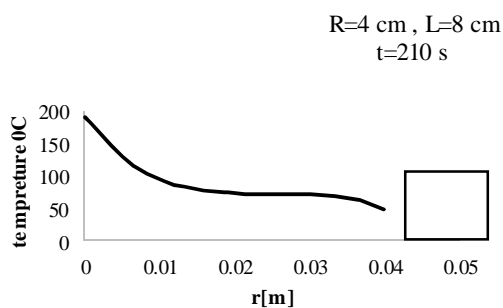
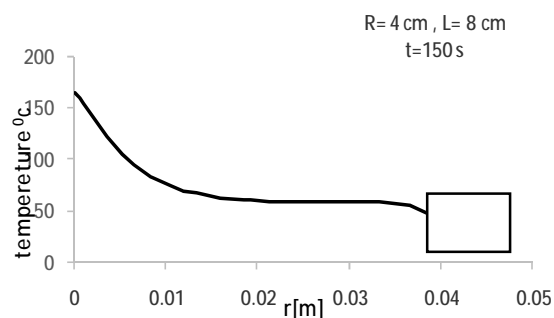
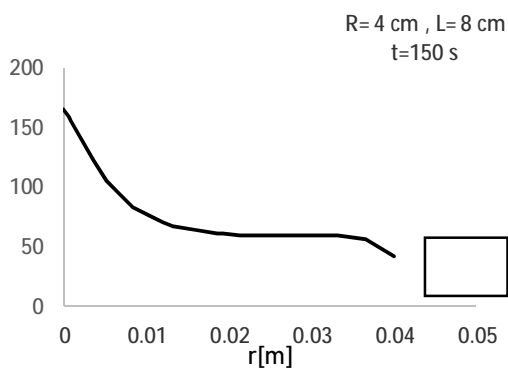
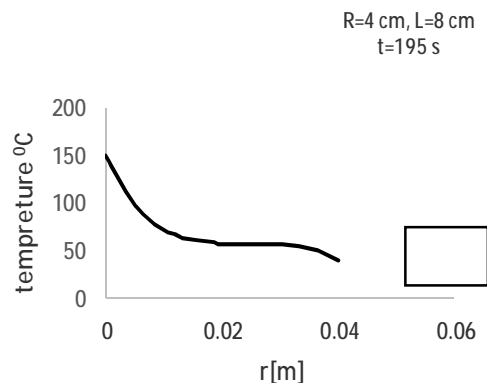
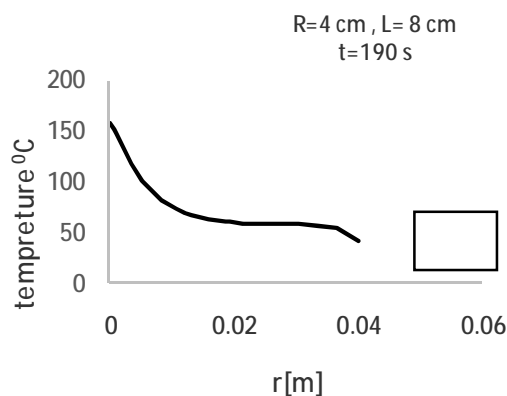


و



شکل 9- شکل های سه بعدی حاصل از تجزیه و تحلیل نمونه در نرم افزار در دو حالت کامل و برش داده شده و ابعاد الف)  $32 \times 16$  به مدت 180 ثانیه، ب)  $16 \times 8$  به مدت 180 ثانیه ج)  $14 \times 7$  به مدت 150 ثانیه د)  $10 \times 5$  به مدت 120 ثانیه ه)  $8 \times 4$  به مدت 90 ثانیه و)  $4 \times 2$  به مدت 50 ثانیه

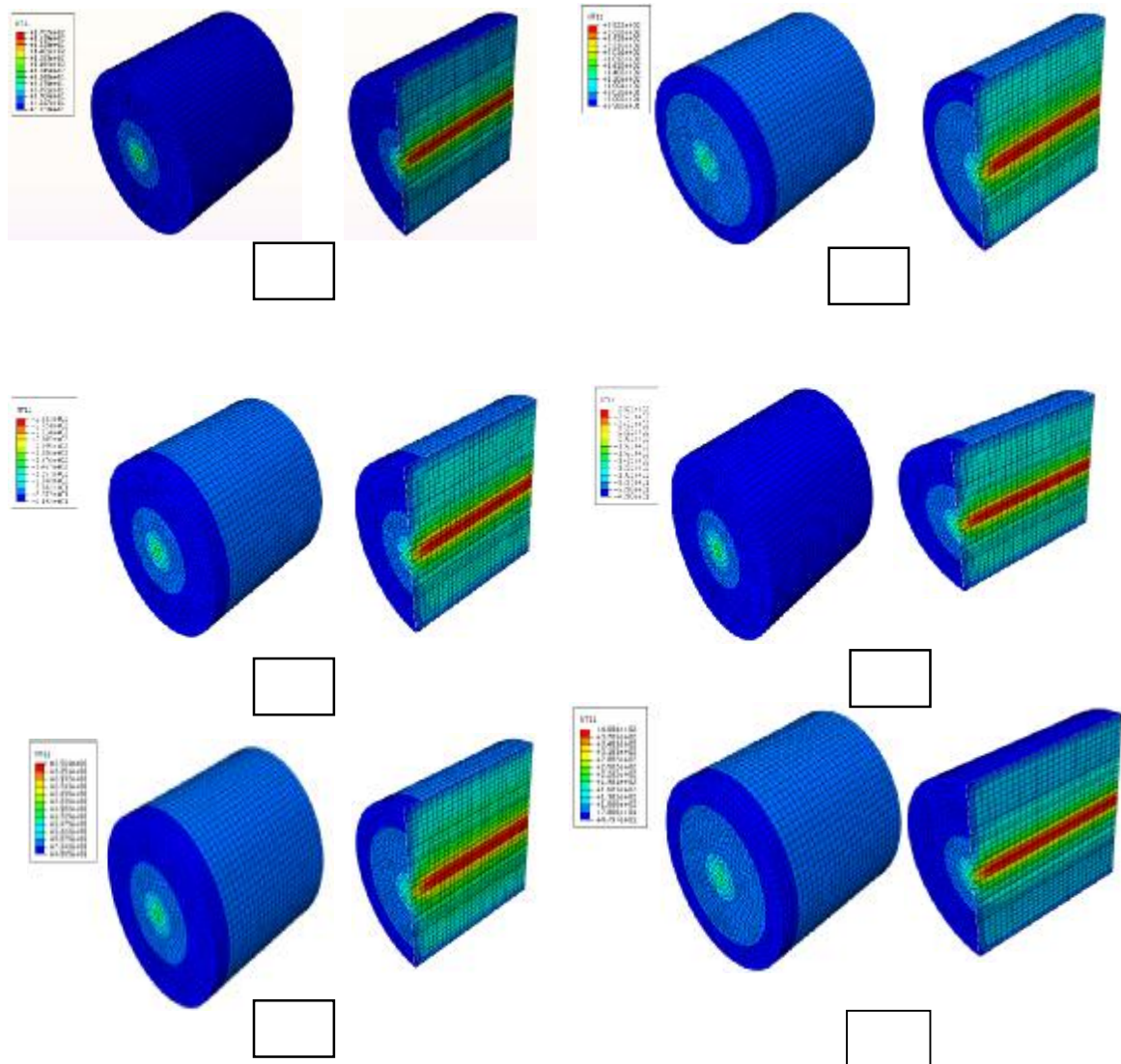




شکل 10- نمودارهای مربوط به توزیع حرارت در شرایط پالسی بودن سیستم الف) در حالتی که سیستم 10 ثانیه روشن و 10 ثانیه خاموش باشد و کل زمان فرآیند 195 ثانیه باشد در حالتی که سیستم 15 ثانیه روشن و 5 ثانیه خاموش باشد و کل زمان فرآیند 195 ثانیه باشد (ب) بررسی توزیع دما در حالتی که سیستم 20 ثانیه روشن و 5 ثانیه خاموش باشد و کل زمان فرآیند 150 ثانیه باشد (د) توزیع حرارت در حالتی که سیستم 70 ثانیه روشن و 5 ثانیه خاموش است و کل زمان فرآیند 150 ثانیه (ه) سیستم 100 ثانیه روشن و 10 ثانیه خاموش است و کل زمان فرآیند 210 ثانیه (و) سیستم 100 ثانیه روشن و 15 ثانیه خاموش است و کل زمان فرآیند 315 ثانیه.

حالت‌های مختلف پالسی بودن سیستم در ابعاد  $8 \times 4$  نیز ارزیابی شد. نتایج مختلف پالس دار بودن سیستم در شکل 10 بصورت نموداری آورده شده است. همچنین توزیع حرارت در ابعاد سه بعدی در شکل 11 قابل مشاهده است.

پس از بررسی‌های انجام شده و مشخص نمودن بسته‌بندی مناسب برای آنزیم‌بری، توزیع حرارت را در حالت ناپیوسته، جهت یکنواختی توزیع حرارت در نمونه و کاهش دما در مرکز نمونه در زمان بارگذاری حرارت، تحقیقات در



شکل 11- شکل های هندسی مربوط به توزیع حرارت در شرایط پالسی بودن سیستم الف) در حالتی که سیستم 10 ثانیه روشن و 10 ثانیه خاموش باشد و زمان 190 ثانیه ب) در حالتی که سیستم 15 ثانیه روشن و 5 ثانیه خاموش باشد و زمان 195 ثانیه ج) بررسی توزیع دما در حالتی که سیستم 20 ثانیه روشن و 5 ثانیه خاموش باشد و زمان 150 ثانیه د) توزیع حرارت در حالتی که سیستم 70 ثانیه روشن و 5 ثانیه خاموش است و زمان 150 ثانیه ه) سیستم 100 ثانیه روشن و 10 ثانیه خاموش است و زمان 210 ثانیه و) سیستم 100 ثانیه روشن و 15 ثانیه خاموش است و زمان 315 ثانیه

#### 4- نتیجه گیری

از نتایج بالا می توان چنین استنباط کرد که پالسی کردن سیستم در زمان حرارت دهی بمنظور توزیع حرارت مزایا و معایب خاص خود را دارد. چراکه، علی الرغم شیب ملایم شکل ها مرکز نمونه حرارت زیادی را می بیند ولی حجم قابل توجهی از نمونه ها درجه حرارت بالاتر از 80 را دارد. در مقایسه حرارت دهی نمونه در زمان 90 ثانیه بصورت پیوسته مرکز نمونه تا دمای 200 درجه را نشان می دهد و همین درجه حرارت در زمان 315 ثانیه در حالت پالسی بودن حاصل می شود. در حالی که بر اساس مطالعات انجام گرفته، نشان داده شده که در گرمایش پالس دار ماکروویو، نفوذ گرمایی در حین دوره ی خاموشی رخ می دهد و از این رو، نوسان ایجاد شده در حین دوره ی روشنی جبران می شود، یکنواختی بهتر دمایی و کاهش اساسی در نواحی داغ در حین گرمایش ماکروویو پالس دار دیده شده است. این در حالی است که در گرمایش ماکروویو بصورت پیوسته چنین چیزی دیده نمی شود (15). دمای پیش بینی شده به وسیله ی معادلات ماکسول دقت بالاتری نسبت به معادلات قانون لامبرت داشته اند. این امر ناشی از این واقعیت است که معادلات ماکسول تنها اثر امواج ایستا را درون نمونه در نظر می گیرند، این در حالی است که قانون لامبرت اثر امواج ایستا را به حساب نمی آورد. این امر ناشی از فرض نیمه بی نهایت بودن طول نمونه ماده است. معادلات ماکسول الگویی نوسانی را برای گرمایش پیوسته نمونه ها در نظر گرفته اند ولی در گرمایش پالس دار ماکروویو، منحنی های همواری پیش بینی شده اند (15). در مقایسه بین شرایط حرارت دهی پیوسته و ناپیوسته نتایج نشان داد هر کدام از این دو حالت دارای مزایای خاص خود است. در حرارت دهی پیوسته مرکز نمونه دارای دمای بیشتر و توزیع دما از یکنواختی کمتری برخوردار است. این در حالی است که در حرارت دهی ناپیوسته دمای بیشینه مرکز نمونه کاهش یافته و یکنواختی بیشتری در توزیع دما مشاهده می شود. لازم به ذکر است که در حالت ناپیوسته فرآیند در مدت زمان طولانی تری پایان خواهد یافت.

#### 5- منابع

1. Mudgett, R. E. 1986. Microwave properties of heating characteristics of foods. *Food Technology*, 2, 35–121.
2. Romano, V. R., Marra, F. and Tammaro, U. 2005. Modelling of microwave heating of foodstuff: study on the influence of sample dimensions with a FEM approach. *Journal of Food Engineering*, 71, 233–241.
3. Oliveira, M. E. C. and Franca, A. S. 2002. Microwave heating of foodstuff. *Journal of Food Engineering*, 53, 347–359.
4. Datta, A. K. and Davidson, P. M. 2000. Microwave and radio frequency processing. *Journal of Food Science*, 65, 32–41.
5. Ayappa, K. G. 1991. Analysis of microwave heating of materials with temperature dependent properties. *AIChE Journal*, 37(3), 313–322.
6. Lin, Y. E., Anantheswaran, R. C. and Puri, V. M. 1995. Finite element analysis of microwave heating of solid foods. *Journal Food Engineering*, 25, 85–112.
7. Zhou, L., Puri, V. M., Anantheswaran, R. C. and Yeh, G. 1995. Finite element modeling of heat and mass transfer in food materials during microwave heating—model development and validation. *Journal of Food Engineering*, 25, 509–529.
8. Sanga, E. C. M., Mujumdar, A. S. and Raghavan, G. S. V. 2002. Simulation of convection-microwave drying for a shrinking material. *Chemical Engineering and Processing*, 41, 487–499.
9. Ahmed, L.F., Rezaq, A.A. and Atti, M.R.A. 2010. Additional effect of defatted wheat germ Protein Isolate on nutritional value and functional properties of yogurts and biscuits. *Australian journal of basic and applied sciences*, 4(8): 3139-3147.
10. Hemis, M., Singh, C. B. and Jayas, D. S. 2011. Microwave-assisted thin layer drying of wheat. *Drying Technology*, 29(10), 1240-1247.
11. Tavman, S. and Tavman, I. H. 1998. Measurement of effective thermal conductivity of wheat as a function of

- treatments on wheat germ lipase activity. *International Journal of Food Science and Technology*, 28, 617-623.
15. Yang, H. W. and Gunasekaran, S. 2004. Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equations and Lambert's law during pulsed microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 64, 445-453.
- moisture content. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 25(5), 733-741.
12. Aregba, A. W. and Nadeau, J. P. 2006. Comparison of two non equilibrium models for static grain deep bed drying by numerical simulation. *Journal of Food Engineering*, 77(1), 27-40.
13. Nelson, S. O., Kraszewski, A.W., Trabelsi, S., & Lawrence, K. C. (2000). Using cereal grain permittivity for sensing moisture content. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 49(3), 470-475.
14. Kermasha, S., Bisakowski, B., Ramaswamy, H. and Van De Voort, F. 1993. Comparison of microwave, conventional and combination heat