

## بررسی مقایسه‌ای فرآیند انتقال جرم بر اساس روش عددی تفاضل محدود و نتایج آزمایشگاهی برای خشک شدن محصول خربزه درختی

شهلا خدابخش اقدم<sup>۱</sup> - مهدی مرادی<sup>۲\*</sup> - علیرضا یوسفی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۸/۱

تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۵

### چکیده

در این پژوهش، میوه خربزه درختی با ابعاد  $5 \times 2 \times 0.5$  سانتی متر مکعب در دمای ۴۵ درجه سلسیوس توسط خشک کن کابینی بوسیله جریان هوا با سرعت  $0.9$  متر بر ثانیه و رطوبت نسبی  $30\%$  درصد خشک گردید. پس از آن ضریب انتشار رطوبتی محصول در شرایط آزمایش تعیین شد. سپس معادله مربوط به انتقال جرم با شرایط مرزی معلوم به صورت دو بعدی بر اساس روش تفاضل محدود حل گردید. در نهایت ضریب همبستگی بین رطوبت بدست آمده از نمونه های مورد آزمایش و رطوبت حاصل از حل معادله انتقال محاسبه شد که مقدار آن  $0.996$  و میزان RMSE حاصله  $0.00115$  بود. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که روش عددی تفاضل محدود در حل معادله انتقال جرم، دارای خطای بسیار کم و همبستگی بسیار بالا با داده های آزمایشگاهی می باشد.

واژه های کلیدی: انتقال جرم، خربزه درختی، خشک کردن، مدل سازی عددی

### مقدمه

بسیار زیادی جهت توصیف دقیق فرآیند خشک شدن انجام گرفته است. در بیشتر این تحقیقات صورت گرفته، فرض بر این بوده است که انتشار رطوبت در داخل محصول، تعیین کننده نرخ خشک شدن آن باشد.

(Pabis and Henderson, 1961; Henderson and Perry, 1967)  
این فرض به دلیل اینکه اکثر عملیات خشک کردن محصولات کشاورزی در مرحله خشک شدن با نرخ نزولی صورت می پذیرد، قابل قبول و منطقی است (Brooker *et al.*, 1992). هرچند Whitaker و Chou در سال ۱۹۸۳ پیشنهاد کردند که برای کاربرد این فرضیه باید احتیاط لازم را لحاظ نمود، چرا که علاوه بر ضریب انتشار رطوبت درون ماده، خاصیت موینگی جرمی، فشار های اسمزی و فشار های ثقلی می توانند بر پروسه خشک شدن و نرخ آن تاثیرگذار باشند. در این تحقیق نیز، نرخ خشک شدن به عنوان تابعی از ضریب انتشار رطوبت در داخل محصول در نظر گرفته شده است. در سال ۱۹۸۶، Sokhansanj و Bruce مدلی را برای خشک شدن دانه ها پیشنهاد کردند. آنها در این مدل فرض کردند که انتشار رطوبت از داخل دانه به سطح به صورت مایع انجام می شود و این مایع از روی سطح نمونه توسط هوای داغ به بخار تبدیل می گردد. بر این اساس برای پیش بینی نرخ خشک شدن در هر لحظه نیاز به اطلاع از دمای درون دانه

پایا یا خربزه درختی میوه ای شیرین است که دارای ویژگیهای شبیه خربزه و طالبی می باشد. این میوه غنی از ویتامین ث و بتاکریپتوزانتین می باشد که این ترکیبات در حفظ سلامت نقش مهمی دارند. آنزیم پاپائین موجود در این میوه نوعی پروتئاز می باشد و به همین جهت استفاده از این میوه در تولید ژلاتین سبب جلوگیری از تشکیل ژلی سفت می گردد (Yousefi *et al.*, 2009). خشک کردن مواد غذایی یکی از قدیمی ترین روش های نگهداری آن ها می باشد. با کاهش مقدار رطوبت ماده غذایی، امکان فساد میکروبی وجود ندارد و سرعت دیگر واکنش های مضر نیز به مقدار قابل ملاحظه ای کم می شود. خشک کردن ضمن اینکه بر روی محصول اثر محافظتی دارد، وزن و حجم آن را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد و در نتیجه از هزینه های حمل و نقل و ذخیره سازی محصول می کاهد (Singh, 1999). در دهه های اخیر کارهای تئوری و آزمایشگاهی

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، گروه مکانیک، شیراز، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: moradiah@shirazu.ac.ir)

۳- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد

ناممکن است).

## تجزیه و تحلیل تئوری

### تعیین ضریب انتقال جرم

بر اساس قانون فیک، معادله انتقال جرم در یک قطعه مکعب شکل محصول در حالت دو بعدی به صورت معادله (۱) می‌باشد (Pabis et al., 1998).

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

که در این معادله W میزان رطوبت، t زمان و D ضریب انتشار می‌باشد.

از آنجایی که ضخامت قطعات تهیه شده نمونه (۵/۰ سانتیمتر) در برابر طول و عرض (به ترتیب ۵ و ۲ سانتی متر) کم می‌باشد می‌توان فرض کرد که انتشار رطوبت در راستای ضخامت محصول صورت می‌گیرد. حل تحلیلی معادله (۱) به صورت روبرو می‌باشد (Anoar et al., 2003):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (2)$$

که:

MR: نسبت رطوبت محصول

t: زمان (s)

$D_{eff}$ : ضریب انتشار رطوبتی موثر داخل محصول ( $m^2 s^{-1}$ )

L: ضخامت متوسط قطعه (m)

n = یک عدد صحیح مثبت

چون که مقدار رطوبت محصول در هر لحظه از پروسه خشک شدن معلوم است، بنابراین در معادله (۲) فقط ضریب انتشار رطوبتی مجهول است که با قرار دادن مقادیر درصد رطوبت در هر لحظه از زمان خشک شدن و زمان مقارن با آن می‌توان مقدار مجهول  $D_{eff}$  را به کمک نرم افزار برنامه نویسی MATLAB بدست آورد. از این طریق ضریب انتشار رطوبتی میانگین این محصول مقدار  $0.39 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$  بدست آورده شد.

### حل عددی معادله انتقال جرم

پس از این که میانگین ضریب انتشار رطوبتی بدست آمد ( $0.39 \times 10^{-9}$ )، معادله انتقال جرم به روش عددی حل شد. برای حل این معادله به شیوه عددی، روش های المان محدود<sup>۳</sup> و تفاضل

و گرادیان رطوبتی در همان لحظه بود، اما با توجه به تعریف معادله انتقال جرم و انتقال حرارت می‌توان به میزان رطوبت و درجه حرارت در هر لحظه از زمان دسترسی پیدا کرد. عموماً روش های مختلفی برای حل این معادلات وجود دارد که دو روش کلی آن حل تحلیلی و حل عددی معادلات انتقال جرم و انتقال حرارت می‌باشد (Brooker et al., 1992).

خشک کردن شامل یک مجموعه ترکیبی از معادلات انتقال جرم و انتقال حرارت می‌باشد (Barbosa, 1996; Fellows, 2000). برای رسیدن به نتیجه ای مطلوب جهت خشک کردن میوه ها و سبزیجات در طول فرآیند خشک کردن، انتقال جرم و حرارت به صورت مناسبی باید در داخل محصول انجام شود. طراحی این فرآیند ها نیازمند تحلیل دقیق انتقال جرم و حرارت در داخل ساختمان محصول است. بنابراین فقط از طریق تحلیل و شناخت این فرآیند ها می‌توان به حداکثر بازدهی و مناسبترین کیفیت دست یافت (Singh, 1999). مهمترین هدف از مدل کردن فرآیند خشک شدن پیش بینی نرخ خشک شدن محصول می‌باشد. به منظور پیش بینی بهتر فرآیند خشک شدن محصولات کشاورزی، خشک کردن به روش لایه نازک<sup>۱</sup> بهترین حالت می‌باشد (Zomorodian and Moradi, 2010). به طور کلی سه نوع مدل برای پیش بینی فرآیند خشک شدن وجود دارد: مدل های تئوری که به مشخصات نمونه بستگی دارد، مدل های تجربی که از روی نتایج آزمایش بهترین مدل را با برآزش دادن بین میانگین داده های آزمایش بدست می‌آورند و مدل های نیمه تجربی<sup>۲</sup> که حالتی بین مدل های تئوری و تجربی هستند و بر اساس قانون فیک در فرآیند انتشار بدست می‌آیند و ضرایب آنها بسته به شرایط آزمایش تعیین می‌گردند. این مدل ها شامل مدل Modified Henderson, Midilli et al., 2002; و غیره هستند (Page, Page, Midilli et al., 2002; Ozdomier and Devres, 1999; Demirates et al., 1998).

در سال ۱۹۹۰، Haghghi و همکاران بوسیله روش اجزای محدود نرخ خشک شدن دانه جو را پیش بینی کردند. آنها محصول را در دماهای متفاوت خشک کردند و توانستند از حل همزمان دو معادله انتقال جرم و انتقال حرارت به سنتیک خشک شدن آن دسترسی پیدا کنند.

هدف از این مقاله، مدل سازی عددی معادله انتقال جرم بر اساس روش تفاضل محدود و مقایسه میانگین نتایج حاصل از آن با رطوبت بدست آمده از آزمایش می‌باشد تا در نهایت میزان همبستگی و مقدار خطا (دقت) روش عددی به کار رفته برای حل معادله انتقال جرم سنجیده شود. به علاوه با این روش می‌توان به مقدار رطوبت در نقاط مختلف محصول رسید (کاری که با وسایل آزمایشگاهی موجود تقریباً

1- Thin layer drying

2- Semi-theoretical

3- Finite element method

### مواد و روش ها

در این تحقیق، خربزه درختی با رطوبت اولیه ۵۸۹/۱۸ درصد (بر مبنای خشک) توسط دستگاه خشک کن کابینی خشک شد. دمای هوای خشک کننده ۴۵ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی آن ۳۰ درصد و سرعت آن ۰/۹ متر بر ثانیه انتخاب گردید. قطعات مکعب شکل با ابعاد ۵×۲×۰/۵ سانتی متر مکعب از محصول بریده شد و به روش لایه نازک تا رطوبت ۲۰±۱ درصد (بر مبنای خشک) خشک گردید. در طول پروسه خشک کردن ۱۶ مرتبه از محصول نمونه برداری شد و تا رسیدن به وزن ثابت در آون الکتریکی تحت دمای ۸۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته تا درصد رطوبت نمونه در زمان های مورد نظر بدست آید (Henderson and Perry, 1976). برای این که بتوان نتایج حاصله از آزمایش را با نتایج مدل مقایسه کرد، فاصله های زمانی نمونه برداری را کمتر کرده (تعداد نمونه گیری بیشتر شده) تا مقایسه دقیق تر انجام گیرد. زمانهای نمونه برداری عبارت بودند از ۲۱۰، ۱۸۰، ۱۴۰، ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰، ۶۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰، ۰، ۲۴۰، ۲۵۰، ۲۶۰ و ۲۷۵. پس از ترسیم نمودار خشک شدن مشخص شد که عملیات خشک شدن مربوط به این محصول در فاز نزولی صورت می پذیرد. برای تعیین ضریب انتشار رطوبتی از قانون فیک در انتقال جرم استفاده شد (معادلات ۱ و ۲). ضریب انتشار رطوبتی به مقدار رطوبت ماده و درجه حرارت بستگی زیادی دارد (Brooker et al., 1992). در این پژوهش مقدار دما ثابت (۴۵ درجه سلسیوس) در نظر گرفته شد، بنابراین ضریب انتشار رطوبتی فقط با کم شدن رطوبت محصول در طی زمان خشک شدن تغییر می کرد. در هر یک از زمان های نمونه برداری ذکر شده یک مقدار مشخص برای ضریب انتشار رطوبت بدست آمد و در نهایت از میانگین این مقادیر در معادله انتقال جرم استفاده گردید. مقدار میانگین ضریب انتشار رطوبتی در شرایط آزمایش برای این محصول  $0.39 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$  بدست آمد. برای حل معادله به روش تفاضل محدود، از نرم افزار برنامه نویسی 7 MATLAB استفاده شد. از آنجایی که مقدار رطوبت اولیه محصول بر پایه خشک ( $M_0$ ) مساوی ۵/۸۹۱۸ (اعشاری) بود، شرایط مرزی و اولیه این محصول به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$M_0 = 5.8918$$

$$M(x_0, t) = e^{-\tau t} (M_0 - M_e) \quad (4)$$

$$M(0, t) = e^{-\tau t} (M_0 - M_e) \quad (5)$$

که ضریب ثابت  $\tau$ ، بر اساس داده های آزمایش مساوی ۰/۱۲۹۴۸ بدست آمد. رطوبت اولیه بر حسب اعشاری می باشد. میزان رطوبت تعادلی ( $M_e$ ) محصول تقریباً برابر رطوبت هوای خشک کننده، ۲ درصد (۰/۰۲) در نظر گرفته شد (Brooker et al., 1992).

محدود<sup>۱</sup> وجود دارند. در این پژوهش به دلیل پیچیدگی کمتر و دقت نسبتاً خوب، روش تفاضل محدود انتخاب گردید. روش تفاضل محدود بر پایه تغییرات متغیر وابسته نسبت به تغییرات متغیر مستقل بنا نهاده شده است. عموماً روش تفاضل محدود برای حل عددی کلیه معادلات دیفرانسیل و جزئی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش، مقدار رطوبت در هر نقطه (گره) را می توان به سه صورت تفاضل پیش رو<sup>۲</sup>، تفاضل پس رو<sup>۳</sup> و تفاضل مرکزی<sup>۴</sup> تعریف نمود (Incropera et al., 2005).

در این تحقیق جهت حل معادله انتقال جرم، از روش تفاضل مرکزی استفاده شد. بسط معادله فیک (معادله ۱) بر اساس این روش تفاضل به شرح زیر است:

$$\frac{M(t+h, x, y) - M(t, x, y)}{h} = D \frac{M(x+h, y, t) - 2M(x, y, t) + M(x-h, y, t)}{h^2} \quad (4)$$

که در معادلات بالا:

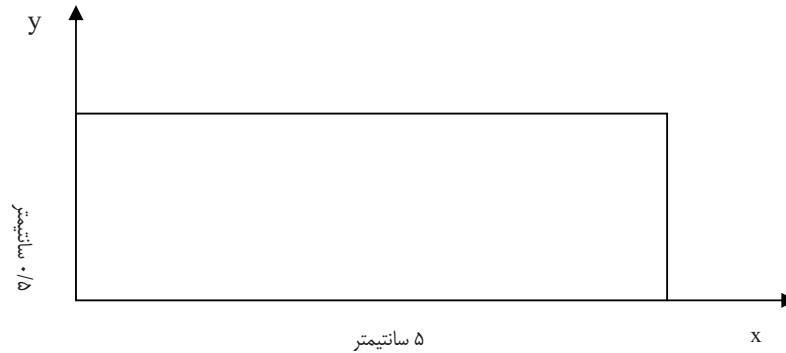
x و y: ابعاد جسم M (m): رطوبت (اعشاری) h اندازه المان انتخابی D (m) = ضریب انتشار رطوبتی داخل محصول  $(m^2 s^{-1})$ : t: زمان (s)

مقدار h هر چه قدر کمتر انتخاب گردد، دقت بالاتر می رود. در این پژوهش این مقدار ۰/۰۰۵۶۸ متر انتخاب گردید. حل معادلات مشتق جزئی به کمک شرایط مرزی، امکان پذیر می باشد.

### تعریف شرایط مرزی و اولیه

به طور کلی شرایط مرزی در معادلات مشتقات جزئی می تواند در سه دسته کلی قرار گیرد: (Incropera et al., 2005)  
شرایط دیریشله<sup>۵</sup>: در این نوع شرط مرزی که بیشتر در مختصات کارتزین استفاده می شود (در اجسام تخت)، رطوبت در  $x=0$  و  $x=1$  معلوم می باشد. به عبارت دیگر داریم:  
 $M(x=0, t)$ : معلوم x راستای محوری است که انتقال جرم در راستای آن انجام می شود و l طول در همان راستاست.  
شرایط نیومن<sup>۶</sup>: در این نوع، شار رطوبتی روی مرزی معلوم می باشد.  
شرایط مختلط<sup>۷</sup>: ترکیبی از دو نوع اول و دوم می باشد.

- 1-Finite difference method
- 2-Forward finite difference
- 3-Backward finite difference
- 4-Central finite difference
- 5-Dirichlet boundary conditions
- 6-Neumann boundary conditions
- 7-Mixed boundary conditions



شکل ۱- ابعاد طولی و عرضی نمای مورد تحلیل در MATLAB

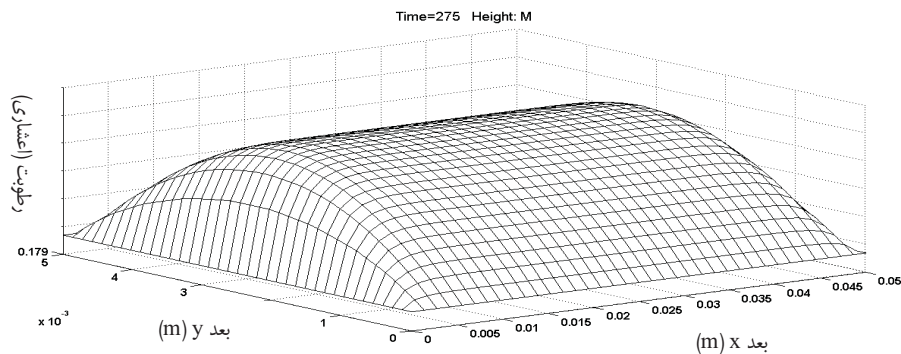
می‌شود، میزان تغییرات رطوبت در راستای ضخامت صفحه بیشتر از میزان تغییرات رطوبت در راستای طول صفحه است به گونه ای که تغییرات رطوبت در راستای طول (ضلع ۵ سانتی متری) آنقدر کم است که آنرا می‌توان ثابت در نظر گرفت. این امر می‌تواند به دلیل بیشتر بودن میزان خروج رطوبت از طریق صفحه های بزرگ نمونه باشد. بنابراین میزان انتشار رطوبت در راستای ضخامت قطعه خیلی بیشتر از انتشار رطوبت در راستای طول آن خواهد بود. از این رو تغییرات رطوبت فقط در راستای ضخامت قطعه در نظر گرفته شد.

به این ترتیب برای هر زمان از طول مدت خشک شدن می‌توان نمودار پراکندگی رطوبت در داخل قطعه نمونه را ترسیم کرد. به عنوان نمونه، اشکال ۵ و ۶ به ترتیب نمودار تغییرات رطوبتی دقایق ۱۰ و ۲۱۰ را نشان می‌دهند. همه این نمودارها از نظر شکل ظاهری شبیه به همدیگر هستند. به گونه ای که در دو طرف قطعه میزان رطوبت کمتر از میزان رطوبت در وسط قطعه است.

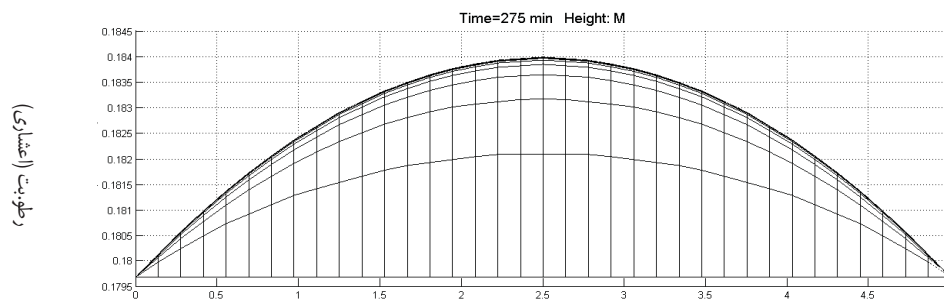
در این تحقیق برای حل معادلات از روش حل صریح استفاده شد. در روش حل صریح رطوبت هر گره در زمان  $t+\Delta t$  از اطلاعات مربوط به رطوبت همان گره و گره های مجاور در زمان قبلی  $t$  محاسبه شد.

### نتایج و بحث

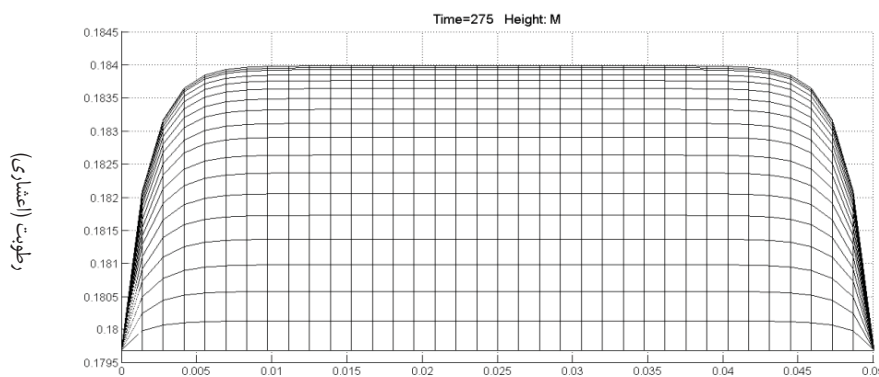
برای پیش بینی درصد رطوبت در هر لحظه از زمان خشک شدن و هر مکان از قطعه محصول، معادله مشتق جزئی انتقال جرم با استفاده از روش تفاضل محدود حل گردید. برای حل این معادله از نرم افزار برنامه نویسی 7 MATLAB استفاده شد. این معادله برای همه زمان های نمونه برداری ذکر شده حل گردید که نمودارهای بدست آمده در دقایق ۱۰، ۲۱۰ و ۲۷۵ به عنوان نمونه آورده شده است (اشکال ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶). پراکندگی رطوبت برای دقیقه ۲۷۵، به صورت شکل ۲ بدست آمد. همان گونه که از این نمودار مشخص



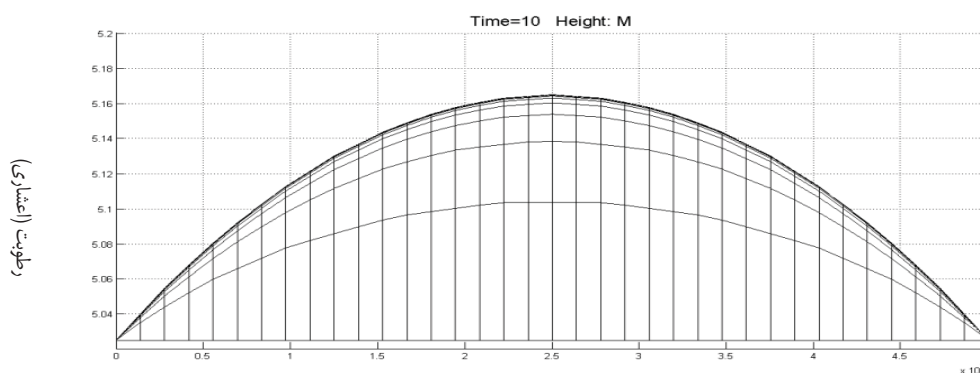
شکل ۲- نمودار پراکندگی رطوبت در دو بعد x و y



شکل ۳- نمودار پراکندگی رطوبت در راستای ضخامت قطعه در دقیقه ۲۷۵  
ضخامت (بعد y) (m)



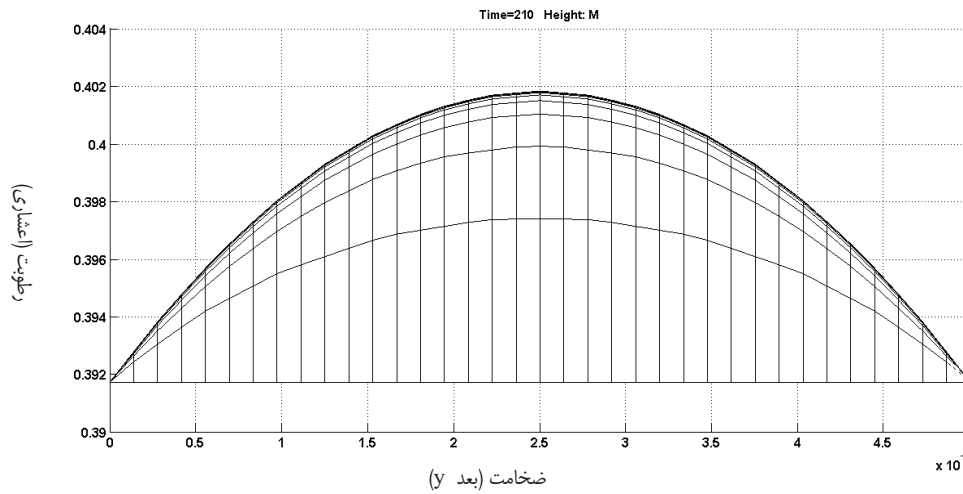
شکل ۴- نمودار پراکندگی رطوبت در راستای طول قطعه در دقیقه ۲۷۵  
ضخامت (بعد y) (m)



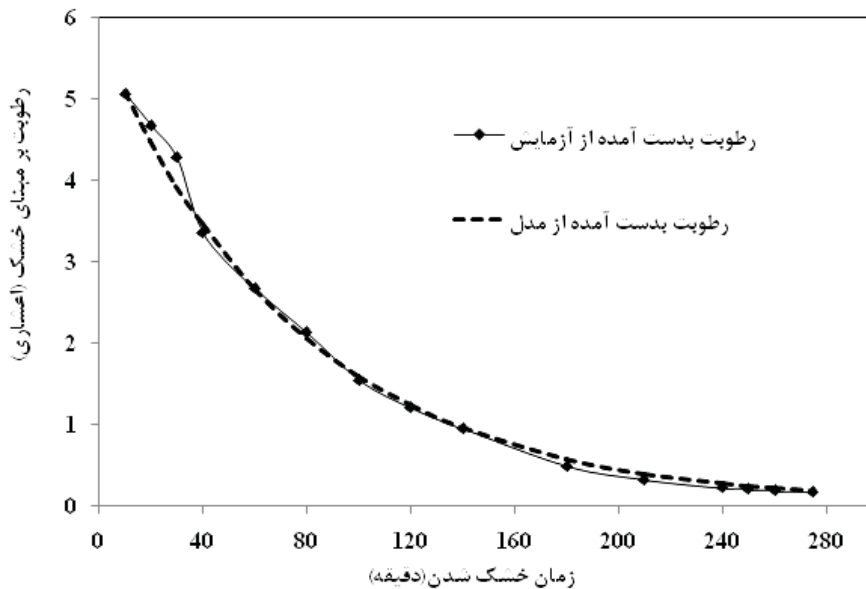
شکل ۵- نمودار پراکندگی رطوبت در راستای ضخامت قطعه در دقیقه ۱۰  
ضخامت (بعد y) (m)

و داده های بدست آمده از مدل برابر  $0.996/$  و میزان  $RMSE^1$  مساوی  $0.00115/$  است.

به همین ترتیب برای ۱۶ زمان مختلف (دقایق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۸۰، ۲۱۰، ۲۴۰، ۲۵۰، ۲۶۰ و ۲۷۵) نمودار پراکندگی رطوبت در داخل نمونه اندازه گیری گردید. برای هر زمان، میانگین رطوبت داخل نمونه بدست آمد. سپس میانگین رطوبت نمونه در هر زمان با داده های بدست آمده از آزمایش مقایسه گردید (شکل ۷). نتایج نشان داد که میزان همبستگی بین داده های آزمایش



شکل ۶- نمودار پراکندگی رطوبت در راستای ضخامت قطعه در دقیقه ۲۱۰



شکل ۷- مقایسه بین داده های بدست آمده از مدل و داده های بدست آمده از آزمایش

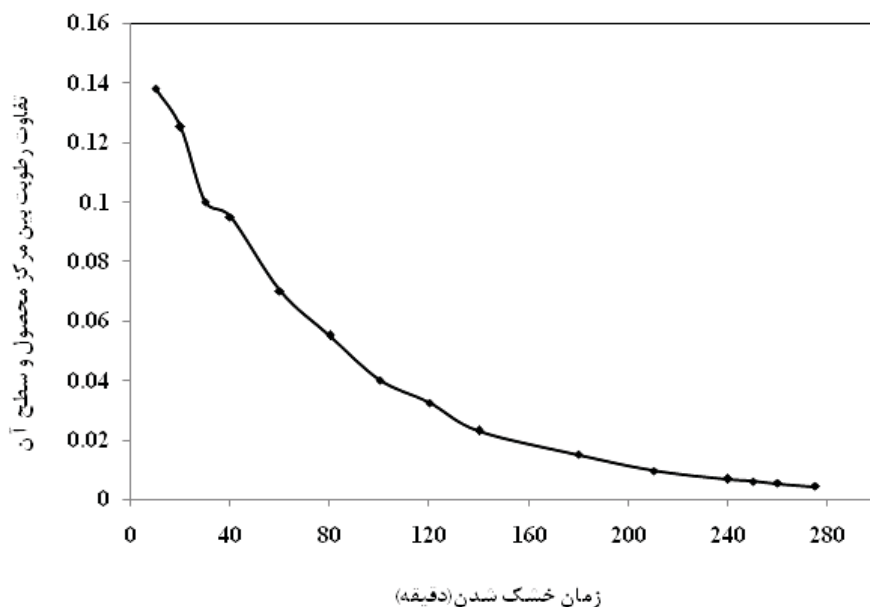
### نتیجه گیری

در این تحقیق، معادله انتقال جرم به کمک نرم افزار MATLAB 7 بر اساس روش تفاضل متناهی حل گردید، به گونه ای که مقدار رطوبت محصول خربزه درختی در زمان های مختلف خشک شدن و در نقاط متفاوت قطعه محصول بدست آورده شد. سپس مقدار رطوبت بدست آمده از این مدل تئوری در طول مدت خشک شدن، با رطوبت بدست آمده از آزمایش مقایسه شد. همچنین

همچنین اختلاف حداکثر و حداقل مقدار محتوای رطوبت در داخل قطعه (مرکز محصول و سطح) در زمان های مختلف با هم مقایسه گردید. نتایج نشان داد که با گذشت زمان اختلاف رطوبت بین مرکز محصول و سطح کمتر شده، به گونه ای که در نهایت نمونه به تعادل رطوبتی نزدیک می شود (شکل ۸). این نتیجه کاملاً منطقی است و این خود دلیلی بر درستی مدل مربوطه می باشد (Brooker *et al.*, 1990).

تطابق کامل است. بنابراین شبیه سازی فرایند خشک شدن به کمک روش ذکر شده در این مقاله می‌تواند به عنوان یک روش مطمئن جهت خشک شدن خربزه درختی مورد استفاده قرار گیرد.

اختلاف رطوبت مرکز و سطح محصول (بدست آمده از مدل) در زمانهای مختلف خشک شدن با هم مقایسه گردید و نتیجه گرفته شد که با گذشت زمان رطوبت مرکز و سطح محصول به هم نزدیکتر می‌شود که این مسئله با اصل تعادل رطوبتی با گذشت زمان در



شکل ۸- اختلاف رطوبت مرکز و سطح محصول در زمانهای مختلف خشک شدن (بدست آمده از مدل تئوری)

## منابع

- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W., 1992, Drying and storage of grains and oilseeds. The AVI publishing company, Inc, 205-217.
- Demirats, C., Ayhan, T. and Kaygusuz, K., 1998, Drying behaviour of hazelnuts. Journal of the Science of Food and Agriculture, 76, 559-564.
- El-Aouar, A. A., Azoubel, P. M. and Murr, F. E. X., 2003, Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*CaricapapayaL.*). Journal of Food Engineering, 59, 85-91.
- Fellows, P., 2000, Food processing technology, principles and practice, 2<sup>nd</sup> edition. Woodhead publishing, Cambridge England, 313-338.
- Barbosa-canovas, G. V. and Vega-mercado, H., 1996, Dehydration of Foods, Springer Publications.
- Henderson, S. M. and Perry, R. L., 1976, Agricultural process engineering, 2<sup>nd</sup> edition. Westport, CT: The AVI publishing company, Inc, 302-337.
- Haghighi, K., Irudayaraj, J., stroshine, R. L. and Sokhansanj S., 1990, Grain kernel drying simulation using the finite element method. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 33(6), 1957-1965.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A.S., Introduction to heat transfer, Fifth edition 2005, John Wiley and sons press, 77-316.
- Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. A, 2002, New model for single-layer drying. Drying Technology, 20, 1503-1513.
- Moradi, M. and Zomorodian, A., 2010, Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for *Cuminum Cuminum*. Journal of Agricultural Science and Technology, 12, 401-408.
- Ozdemir, M. and Devres, Y., 1999, The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. Journal of Food Engineering, 42, 225-233.
- Pabis, S. and Henderson, S. M., 1961, Grain drying theory, a critical analysis of the drying curve for shelled maize. Journal of Agriculture Engineering Research, 6, 272-277.
- Pabis, S., Jayas, D. S. and Cenkowski, S., 1998, Grain drying: theory and practice. John Wiley press, 303.

Singh, R. P. and Heldman, D. R., 1999, Introduction to Food Engineering. Translated by: Mortazavi et al. Ferdowsi University press, p561.

Sokhansanj, S. and Bruce, D. M., 1986, An improved heat transfer model for grain drying simulations. Div. Note DN 1334. Nat. Inst. Agric. Eng., Silso, England.

Whitaker, S. and Chou, W. T. H., 1983, Drying granular porous media-Theory and experiment. Drying technology, 1, 3-33.

Yousefi, A. R., Niakousari, M. and Khajeie, F., 2009, Microwave assisted hot air drying of papaya (*Carica Papaya L.*) pretreated in osmotic solution. In: Technology and management to ensure sustainable agriculture, agro systems, forestry and safety, Artemis press, Italy, 3, 329-333.