

## بررسی تاثیر سیال سازی بر زمان، ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی فعال سازی خشک- کردن میوه بنه

محمد کاوه<sup>1</sup>، رضا امیری چایجان<sup>2</sup>، جعفر امیری پریان<sup>2</sup> و ابراهیم احمدی<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- استاذ یار مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

Skaweh@yahoo.com

### چکیده

در این پژوهش، تاثیر شرایط مختلف بر روی زمان خشک شدن، ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی فعال سازی مورد نیاز برای خشک کردن میوه بنه با استفاده از یک خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشها در تابستان 1390 در آزمایشگاه گروه مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام گرفتند. آزمایشها در سه سطح سرعت 2/08، 3/35 و 4/43 m/s و سه سطح دمایی 40، 60 و 80°C انجام شد. به منظور پیش بینی رطوبت در طی فرآیند خشک کردن از پنج مدل ریاضی استفاده شد. مدل های مذکور به داده های زمان و نسبت های رطوبت به دست آمده طی آزمایشها برازش شد. برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل Logistic با میانگین  $R^2=0/9995$ ،  $\chi^2=0/001148$  و  $RMSE=0/03034$  دارای بهترین عملکرد در پیش بینی رطوبت میوه بنه است. ضریب پخش رطوبت موثر بنه در حین انجام آزمایش بین  $1/18842 \times 10^{-10}$  تا  $1/26 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s حاصل شد. همچنین انرژی فعال سازی 50/226 تا 50/737 kJ/mol به دست آمد.

کلمات کلیدی: انرژی فعال سازی، بستر سیال، بنه، خشک کردن، ضریب پخش رطوبت موثر

### مقدمه

بنه (*Pistacia Atlantica L*) درختی است که با طول عمر طولانی که ارتفاعش به پنج متر می رسد. زمان برداشت میوه بنه اردیبهشت و خرداد است. به طور کلی مدت زمان برداشت میوه حدود 60 تا 80 روز به طول می انجامد. میوه درخت بنه ریز و کروی مانند و به رنگ سبز تیره است. مغز میوه بنه به پسته شبیه ولی کوچکتر از آن است. کاربرد میوه بنه که در کردستان به آن قزوان می گویند برای خوشبو کردن دوغ و روغن حیوانی است و همچنین در درست کردن ترشی از آن استفاده می شود [مهران، 1377]. رطوبت زیاد محصول بنه در هنگام برداشت که حدود 2/6 (d.b.) می باشد سبب می شود ماندگاری محصول زیاد نباشد.

میوه تازه بنه به واسطه بالا بودن میزان محتوای رطوبتی، به طور جدی در معرض فساد قرار می گیرد. خشک کردن بهترین راه برای به حداقل رساندن ضایعات آن می باشد و نیز به واسطه کمتر شدن وزن و حجم محصول خشک شده، بسته بندی و حمل و نقل آن آسانتر و کم هزینه تر می شود. عمل خشک کردن فرآیندی است که انرژی ورودی بسیاری را به دلیل وجود گرمای ن هان تبخیر آب و بازده نسبتا کم خشک کن های صنعتی نیاز دارد [Syahrul et al., 2002]. خشک کردن لایه نازک به فرآیند خشک کردن دانه ها می گویند که تمام دانه ها در

شرایط یکسان هوای داغ (در یک دما و رطوبت ثابت) قرار گیرند. تمام خشک کن های هوای داغ بر اساس خشک شدن لایه نازک مدل سازی می شوند [Ozdemir and Devres, 1999].

سیال سازی یکی از روش هایی است که به طور گسترده در خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی استفاده می شود. روش بستر سیال به عنوان یک فرآیند آرام و یکنواخت خشک شدن شناخته شده که قابلیت کاهش رطوبت مواد را با بازده بالا دارد. مشخصه این فرآیند، استفاده از موادی با میزان رطوبت بالا و کنترل حرارتی مناسب به علت اختلاط مواد است [Shilton and Neranjan, 1993]. سیال سازی پدیده ای است که به وسیله آن ذرات جامد در سیال معلق شده و شبیه سیال عمل می کنند. هنگامی که یک سیال از میان ذرات یک بستر مواد به سمت بالا هدایت شود، در دبی پایین، یک بستر ثابت خواهیم داشت. با افزایش دبی جریان، به ترتیب بستر منبسط شده، شرایط حداقل سیال سازی، بستر سیال حبابی و انتقال هوایی مواد جامد را خواهیم داشت [Kunni and Levenspiel, 1991].

تحقیقات زیادی در مورد ضریب نفوذ موثر رطوبت، انرژی فعال سازی بر روی لایه نازک محصولات از جمله سبزیجات و میوه های مختلف مانند انجیر [Babalıs and Belessiotıs, 2004]، دانه های کدو [Amiri Chayjan et al., 2011]، و زرشک [Aghbashlo et al., 2008] انجام شده است. اهمیت خشک کردن بانه و کاهش رطوبت آن برای نگهداری طولانی مدت و استفاده از خصوصیات این محصول می باشد. اما در مورد خشک کردن میوه بانه اطلاعات بسیار کمی وجود دارد که ضرورت این پژوهش را ایجاب می کند. بنابراین هدف از این تحقیق مدل سازی سینتیک خشک کردن، تعیین ضریب پخش رطوبت موثر و آن رژی فعال سازی در طی خشک شدن بانه می باشد.

## مواد و روشها

بانه تازه از جنگل های سردشت، استان آذربایجان غربی تهیه شد و برای انجام آزمایش ها در یخچال در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  نگهداری شد. مقدار رطوبت اولیه بانه به روش آون به دست آمد. نمونه های 10 گرمی در آون در دمای  $^{\circ}\text{C}$   $70 \pm 1$  به مدت 24 ساعت قرار گرفتند. این روند 5 مرتبه تکرار شد و مقدار رطوبت اولیه بانه  $2/6$  (d.b.) بر پایه خشک به دست آمد [Doymaz, 2005].

برای انجام آزمایشات از یک خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی استفاده شد. آزمایشها در سه سطح سرعت 2/08، 3/35 و 4/43 m/s و در سه سطح دمایی 40، 60 و  $80^{\circ}\text{C}$  در شرایط آزمایشگاهی که مقدار رطوبت نسبی محیط آزمایشگاه در طی آزمایشها 25/3 - 33/15٪ بود و دمای محیط آزمایشگاه بین 24/05 تا  $29/09^{\circ}\text{C}$  اندازه گیری شده بود، انجام شد. محصول بانه شبیه کره است بنابراین قطر هندسی  $(0/0072\text{ m})$  به دست آمد. قطر هندسی به دست آمده برای محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت به کار می رود.

قانون دوم فیک که توسط کرانک برای شرایط لایه نازک در محصولات کروی ارائه شد با نادیده گرفتن اثرات دما و مجموع گرادیان فشار می تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف می کند [Crank, 1975]. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن، پخش رطوبتی موثر ثابت و شعاعی است می توان مقدار آن را از معادله زیر محاسبه نمود:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (1)$$

که در آن  $n$  تعداد جملات معادله (1، 2، 3، ...)،  $t$  زمان خشک شدن (s)،  $r$  شعاع هندسی بنه (m)،  $MR$  نسبت رطوبت،  $M$  رطوبت در یک زمان  $M_o$ ، (d.b.) مقدار رطوبت اولیه (d.b.)،  $M_e$  مقدار رطوبت تعادل (d.b.)،  $D_{eff}$  ضریب پخش رطوبت موثر ( $m^2/s$ ). وقتی  $t$  افزایش می یابد، تمام جملات به غیر از جمله اول، صفر می شوند در نتیجه خواهیم داشت [Babalidis and Belessiotis, 2004].

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (2)$$

بعد از ساده شدن، معادله بالا را می توان به صورت خطی نوشت. با اعمال لگاریتم از طرفین معادله می توان آن را به صورت خطی درآورد.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M - M_e}{M_o - M_e}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (3)$$

با رسم  $\ln(MR)$  نسبت به زمان، خطی با شیب  $K_0$  به دست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب  $t$  در رابطه 3، ضریب نفوذ را می توان به دست آورد. با استفاده از معادله آرینوس رابطه بین  $D$  و ضریب پخش رطوبت موثر حاصل می شود که می توان انرژی فعال سازی را به دست آورد [Akpınar et al., 2003].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_a}\right) \quad (4)$$

$E_a$  انرژی فعال سازی (kJ/mol)،  $R_g$  ثابت جهانی گازها که برابر (8/3143 kJ/mol)،  $T_a$  دمای هوای داخل محفظه خشک کن (K)،  $D_0$  عرض از مبدا که مقدار آن ثابت است. با لگاریتم گیری از طرفین معادله (4)، معادله به صورت زیر در می آید:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \left(\frac{E_a}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) \quad (5)$$

با رسم نمودار  $\ln(D_{eff})$  در مقابل  $(1/T_a)$  خطی با شیب  $K_1$  به دست می آید:

$$K_1 = \left(\frac{E_a}{Rg}\right) \quad (6)$$

همچنین برای به دست آوردن پارامترهای پیش بینی رطوبت از معادلات 9، 10 و 11 استفاده شد. معادله (1) را می توان به عنوان مثال به صورت زیر نوشت.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \exp(-kt) \quad (7)$$

که از این مدل ها مقادیر  $R^2$  و RMSE و  $\chi^2$  به دست می آیند [Aghbashlo et al., 2008]. همچنین مقدار

$\frac{M - M_e}{M_o - M_e}$  را می توان به صورت زیر ساده نمود. مقدار  $M_e$  صفر در نظر گرفته می شود و به شکل زیر ارائه می شود:

$$MR = \frac{M}{M_o} \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [MR_{expj} - MR_{pre,i}]^2}{\sum_{k=1}^N \left[ \frac{\sum_{k=1}^n MR_{pre,i}}{N} - MR_{pre,i} \right]^2} \quad (9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{expj} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (10)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{expj})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

N تعداد مشاهدات، z تعداد ثابت‌های خشک کردن،  $MR_{exp,i}$  i مین نسبت رطوبت آزمایش،  $MR_{pre,i}$  i مین پیش - بینی نسبت رطوبت. برای مدل کردن ریاضی خشک شدن بنه از مدل های لایه نازک استفاده شد (جدول 1). برای مدل سازی رفتار خشک شدن بنه و همچنین متوسط نسبت رطوبت خشک شدن آن در درجه حرارت های مختلف از 5 مدل ریاضی استفاده شد. برای محاسبه مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) از نرم افزار Curve Expert (Ver 1.4) استفاده شد.

#### نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از مدل سازی سینتیک میوه بنه در جدول (2) نشان داده شده اند. نتایج نشان داد که مدل Logistic دارای بهترین نتایج بود زیرا  $R^2=0/9995$ ،  $\chi^2=0/001148$  و  $RMSE=0/03034$  به دست آمدند. با توجه به داده های حاصله از جدول 2 مقدار ضریب تعیین هر پنج مدل (Logistic, Logarithmic, Regression, Page, Logarithmic, Regression, ) بیشتر از 0/99 بودند. اما نتایج به دست آمده نشان داد مدل Logistic دارای بیشترین مقدار  $R^2$  است.

جدول 1- مدل های لایه نازک مورد استفاده برای خشک کردن میوه بنه

نام مدل	معادلات مدل	مراجع
Page	$MR=\exp(-kt^n)$	Zhang and Litchfield (1991)
Logarithmic	$MR=a\exp(-kt)+c$	Doymaz (2004)
Regression	$MR=\exp(-(bt+at^2))$	Junling <i>et al.</i> (2008)
logestic	$MR=a/(1+b\exp(kt))$	Cihan <i>et al.</i> (2007)
Midili <i>et al.</i>	$MR=a\exp(-kt^n)+bt$	Midilli <i>et al.</i> (2002)

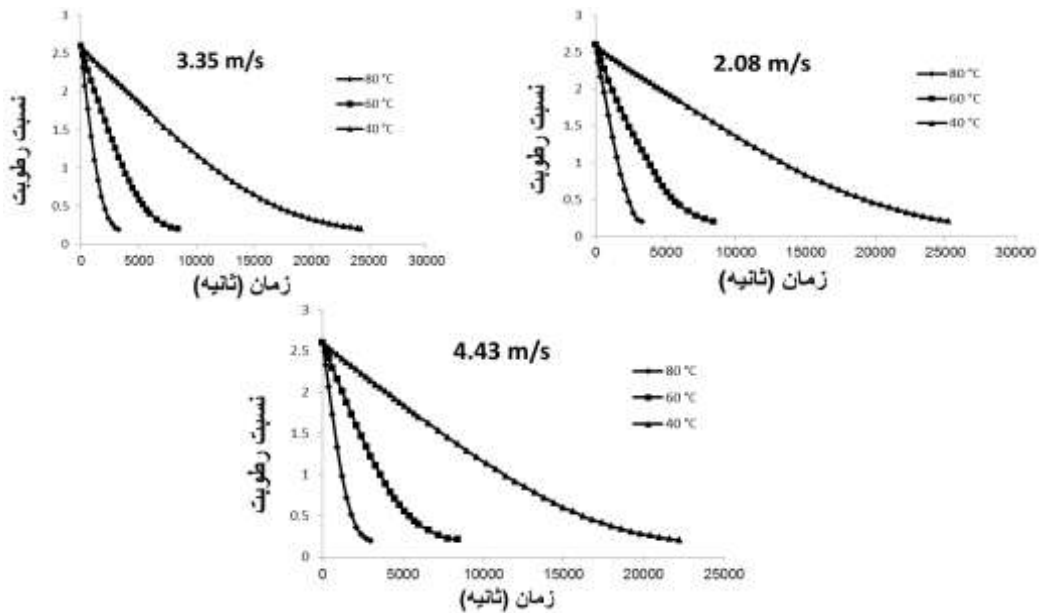
شکل 1 نسبت رطوبت در مقابل زمان (ثانیه) را در سرعت ها و دماهای مختلف نشان می دهند. در این آزمایش ها درجه حرارت بیشترین نقش را در تغییرات نمودارها ایفا می کند. این منحنی ها فرآیند خشک شدن بنه را نشان می دهند. با توجه به شکل ها، با افزایش دمای محفظه خشک کن، رطوبت محصول سریعتر کاهش می یابد. افزایش دمای هوای ورودی در محفظه خشک کن باعث افزایش انتقال جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت سریعتر انجام می شود. منحنی های خشک کردن نشان می دهند که شیب منحنی با افزایش دما افزایش معنی داری می یابد (شکل 1). همچنین تاثیر سرعت هوا بر روی ضریب پخش رطوبت موثر ( $D_{eff}$ ) در این منحنی ها نشان داده شده است که با افزایش سرعت هوا در دماهای پایین اندازه  $D_{eff}$  تغییر معنی داری نمی یابد. بیشترین مقدار  $D_{eff}$   $9^{-9} m^2/s$

( $1/26 \times 10$ ) در دمای  $80^\circ\text{C}$  و سرعت  $4/43 \text{ m/s}$  به دست آمده است و کمترین مقدار آن ( $1/188 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) در دمای  $40^\circ\text{C}$  و سرعت  $2/08 \text{ m/s}$  به دست آمد. درجه حرارت، تاثیر بیشتری بر روی ضریب پخش رطوبت موثر دارد (شکل 3). با توجه به شکل (3) با افزایش دما میزان ضریب پخش رطوبت موثر افزایش می‌یابد. محاسبات نشان می‌دهد رابطه مستقیمی بین ضریب نفوذ موثر رطوبت با سرعت هوا و درجه حرارت وجود دارد. معمولاً مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت در آزمایش‌ها بین  $10^{-9}$  و  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  می‌باشد که مقادیر به دست آمده برای بنه نیز در این محدوده می‌باشد. نتایج به دست آمده در مورد ارتباط ضریب پخش رطوبت موثر بنه با سرعت هوا و دمای خشک کردن نتایج محققان دیگر مانند خشک کردن دانه‌های کدو [Amiri Chayjan *et al.*, 2011] و هلو [Kingsly *et al.*, 2007] مشابهت دارد.

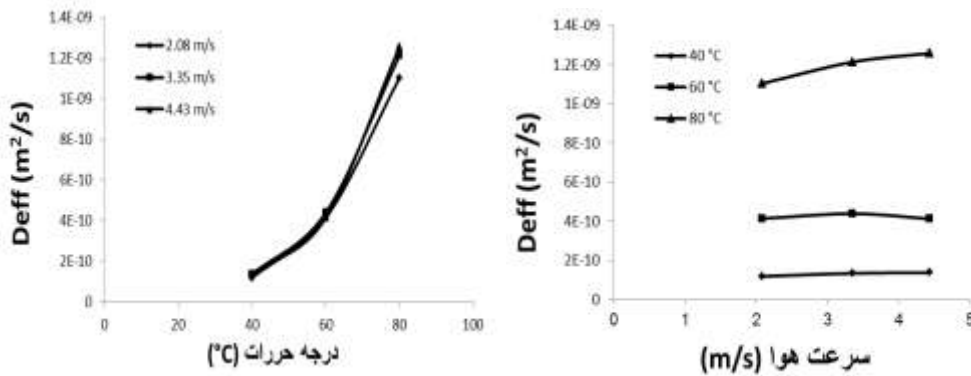
جدول 2- نتایج آماری مدل‌های خشک کردن میوه برع

مدل	دما	$R^2$			$\chi^2$			RMSE		
		2/08	3/35	4/43	2/08	3/35	4/43	2/08	3/35	4/43
Page	40	0/9988	0/9994	0/9989	0/005	0/0026	0/0048	0/072	0/05	0/068
	60	0/9983	0/9990	0/9996	0/0036	0/0020	0/0014	0/057	0/042	0/036
	80	0/9981	0/9994	0/9995	0/0024	0/0007	0/0050	0/043	0/024	0/021
Logarithmic	40	0/9986	0/9972	0/9980	0/0060	0/0150	0/0090	0/08	0/12	0/091
	60	0/9976	0/9969	0/9965	0/0050	0/0067	0/0080	0/07	0/08	0/083
	80	0/9986	0/9980	0/9969	0/0020	0/0025	0/0038	0/037	0/043	0/053
Regresion	40	0/9992	0/9996	0/9996	0/0034	0/0015	0/0010	0/08	0/12	0/090
	60	0/999	0/9993	0/9992	0/0020	0/0013	0/0017	0/07	0/08	0/080
	80	0/9994	0/9994	0/9989	0/0008	0/0007	0/0013	0/018	0/025	0/033
logestic	40	0/9994	0/9998	0/9996	0/0026	0/0006	0/0015	0/05	0/024	0/038
	60	0/999	0/9996	0/9996	0/0020	0/0007	0/0008	0/042	0/026	0/027
	80	0/9992	0/9996	0/9995	0/0010	0/0004	0/0005	0/027	0/017	0/020
Midili et al	40	0/9997	0/9997	0/9995	0/0010	0/0013	0/0016	0/031	0/035	0/040
	60	0/9985	0/9991	0/9994	0/0031	0/0020	0/0013	0/051	0/041	0/033
	80	0/9992	0/9997	0/9998	0/0010	0/0007	0/0004	0/025	0/022	0/017

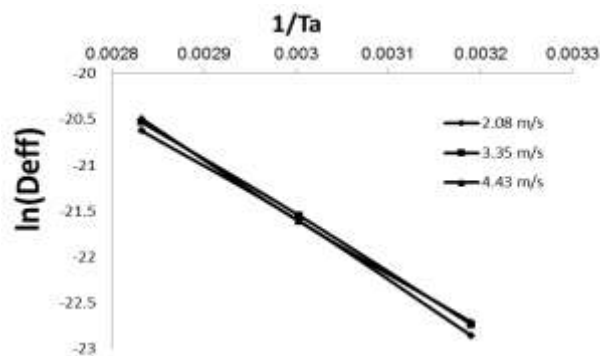
برای محاسبه انرژی فعال سازی ابتدا مقدار  $1/T_a$  محاسبه شد. سپس مقدار آن در مقابل  $\ln(MR)$  ترسیم شد (شکل 3). سپس انرژی فعال سازی  $E_a$  با استفاده از معادله 6 محاسبه شد. مقدار انرژی فعال سازی و ضریب همبستگی برای سطوح مختلف سرعت هوا در جدول (3) نشان داده شده اند. مقدار  $E_a$  برای مواد غذایی و محصولات کشاورزی در محدوده  $12/7$  و  $140 \text{ kJ/mol}$  محاسبه شده است [Babalıs and Belessiotıs, 2004]. کمترین و بیشترین مقدار انرژی فعال سازی بنه طی آزمایشات انجام شده به ترتیب  $50/226$  و  $50/737 \text{ kJ/mol}$  محاسبه شد. با توجه به جدول (3) بیشترین انرژی فعال سازی در سرعت  $4/43 \text{ m/s}$  و کمترین مقدار در سرعت  $2/08 \text{ m/s}$  به دست آمدند. روند آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش سرعت هوا، مقدار انرژی فعال سازی هم افزایش می‌یابد. از اینرو بیشترین مقدار انرژی فعال سازی در بیشترین سرعت هوا به دست آمد. مقادیر انرژی فعال سازی در سرعت‌های مذکور تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند.



شکل 1- نسبت رطوبت در مقابل زمان (ثانیه) در سرعت‌های مختلف هوای ورودی



شکل 3- نمودار ضریب نفوذ در مقابل سرعت هوا و درجه حرارت هوا



شکل 4-  $\ln(D_{eff})$  در مقابل  $1/T_a$  در سرعت‌های مختلف خشک‌کردن بانه

جدول 3- مقادیر انرژی فعال‌سازی و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) در سرعت‌های مختلف

سرعت هوا (m/s)	2/08	3/35	4/43
انرژی فعال سازی (kJ/mol)	50/226	50/581	50/737
ضریب همبستگی ( $R^2$ )	0/9988	0/9999	0/9984

#### منابع

- مهران، م.، فرهنگ علوم غذایی، کشاورزی و منابع طبیعی، تهران. 1377.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M., Samimi-Akhijahani, H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49(10): 2865-2871.
- Akpinar, E., Midilli, A., Bicer, Y. (2003). Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* 44: 1689–1705.
- Amiri Chayjan, R., Salari, K., Abedi, Q., Sabziparvar, A. A. (2011b). Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of squash seeds in a semi fluidized and fluidized bed drying. *Journal of Food Science and Technology*. DOI 10.1007/s13197-011-0399-8.
- Babalis, S. J., and Belessiotis, V. G. (2004). Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65: 449–458.
- Cihan, A., Kahveci, K., and Hacıhafızoglu, O. (2007). Modeling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of Food Engineering*, 79: 293–298.
- Crank, J., (1975). *Mathematics of diffusion* (2nd ed.) London: Oxford University Press.
- Doymaz, I., (2005). Influence of pretreatment solution on the drying of sour-cherry. *Journal of Food Engineering*, 78: 591–6.
- Junling, J. S., Zhangli, P., Tara, H. M., Delilah, W., Hirschberg, E., Olson, D. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar infused blueberries with infrared radiation heating. *Food Science and Technology*, 41: 1962-1972.
- Kingsly, A. R. P., Goyal, R. K., Manikantan, M. R., Ilyas, S.M. (2007). Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behavior of peach slice. *International Journal of Food Science and Technology*, 42: 65-69.
- Kunni, D., and Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*. Stoneham-Butterworth Heineman. USA.
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20:1503–1513.
- Shilton, N. C., and Neranjan, K. (1993). Fluidization and its application to food processing. *Food Structure*, 12: 199-215.
- Syahrul, S., Hamdullahpur, F., Dincer, I. (2002). Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Exergy, an International Journal*, 2: 87–98.
- Zhang, Q., Litchfield, J.B. (1991). An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*, 9: 383-395.