مجله مهندسي بيوسيستم ايران (۴۰) ۲, ۱۳۸۸ (۱۸۴-۱۷۵)

مدل سازي سينتيک خشک شدن کلزا در خشک کن بستر سيال

حميد رضا گازر
استاديار پژوهش ، موسسه تحقيقات فني و مهندسي کشاورزي.
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۷/۱۰/۲۸- تاريخ تصويب: ۱۳۸۸/۹/۲۹)

چکيده

در اين تحقيق سينتيک فرايند خشک شدن کلزا با روش سيال سازي دانه‌ها در محدوده دمايي ۳۰ تا ۱۰۰ °C مورد بررسي و مدل‌سازي قرار گرفت. براي معرفي بهترين مدل تخمين روند تغييرات رطوبت از مدل‌هاي مرسوم در مدل‌سازي خشک کردن محصولات دانه‌اي استفاده شد. به منظور تعيين ضريب نفوذ رطوبت و انرژي فعال سازي در دانه‌هاي کلزا از حل معادله فيک براي اجسام کروي شکل و رابطه آرينيوس استفاده شد. با استفاده از مدل‌هاي رگرسيوني تاثير دما بر زمان خشک شدن کلزا در محدوده دمايي تحقيق نيز مدل سازي شد. نتايج تحقيق نشان داد که بعد از زمان آستانه سيال‌سازي فشار استاتيکي داراي افت محسوسي شده و فشار زير توده محصول در شروع سيال سازي از ۵۹۶ به ۵۸۳ پاسکال تنزل پيدا مي‌کند. در حالت سيال سازي، افزايش دما از ۳۰ به ۱۰۰ °C زمان خشک شدن کلزا را ۷۴% کاهش مي دهد. در بررسي سينتيک خشک شدن کلزا در خشک کن‌هاي بستر سيال به ترتيب مدل‌هاي ديفيوژن تقريبي و نمايي دوجمله‌اي نسبت به مدل‌هاي ديگر برازش بهتري داشتند. اين دو مدل داراي بالاترين ضريب تعيين (R^2)، و کمترين مربع کاي (χ^2) و ريشه متوسط مربع خطاي داده‌ها (*RMSE*) بودند. اما با توجه به اختلاف‌هاي ناچيز در شاخص‌هاي ارزيابي و ضرايب کمتر، کاربرد مدل نيوتن در تخمين روند تغييرات نسبت رطوبت کلزا در حالت بستر سيال قابل توصيه مي‌باشد. با افزايش دما در فرايند خشک شدن دانه‌هاي کلزا، ضريب نفوذ موثر رطوبت در دانه يک روند افزايشي دارد. در فرآيند خشک کردن کلزا با روش بستر سيال محدوده دمايي۳۰ تا ۱۰۰ °C ضريب نفوذ رطوبت کلزا از $۳/۷۵۹\times۱۰^{-۱۱}$ تا $۸/۴۵۷\times۱۰^{-۱۱}$ m^2/s تغيير مي‌کند. در اين تحقيق با استفاده از رابطه آرينيوس، انرژي فعال‌سازي نفوذپذيري رطوبت در کلزا ۱۱/۰۳ kJ/mol به دست آمد. به منظور تخمين زمان خشک شدن کلزا در محدوده دمايي تحقيق، معادله نمايي به دست آمده برازش مناسبي با داده‌هاي به دست آمده داشت.

واژه‌هاي کليدي: کلزا، خشک کردن، بستر سيال، مدل سازي، ضريب نفوذ موثر، انرژي فعال سازي

مقدمه

کلزا به عنوان يکي از دانه‌هاي مهم روغني داراي اهميت قابل توجه‌اي در تامين روغن نباتي مورد استفاده انسان بوده و بسياري از کشورهاي دنيا در سطح وسيع به کشت آن مبادرت مي‌کنند. در کشور ايران نيز طي ده سال گذشته توجه و اهتمام ويژه‌اي در زمينه کشت و توليد گياهان روغني، به ويژه کلزا شده است به طوري که استان‌هاي گلستان و مازندران تقريباً ۶۱ درصد از سطح زير کشت کلزا در کشور را به خود اختصاص داده‌اند (Anon.,2006). کلزا حاوي مواد غذايي مختلفي است که عمده‌ترين آن مقدار روغن موجود در دانه‌ها مي‌باشد. تحقيقات نشان مي‌دهد که در هنگام رسيدگي حدود۸۰ درصد روغن در دانه‌ها قرار دارد و پوسته بذر حاوي کمتر از ۱۲ درصد روغن مي‌باشد. کنجاله کلزا با پروتئين حدود ۴۳-۳۸ درصد داراي ارزش زيادي در جيره غذايي دام و طيور مي باشد (Mohammadzadeh et al., 2004; Azizi et al., 2000; Ahmadi & Javidfar, 1999). به منظور انبار کردن بذور کلزا بايد ابتدا آنها را تميز و تا رطوبت ۸% خشک و در يك انبار با تهويه مطلوب ذخيره کرد. در استان‌هاي گلستان، مازندران و منطقه مغان در صورتي که رطوبت بذور بالا باشد بايد از خشك کن استفاده کرد و پس از ضدعفوني کردن انبار عمل ذخيره سازي دانه‌ها را انجام داد (Anon. 2004). Morison & Roberson (۱۹۷۸) کلزا را تحت دماهاي مختلف تا سطح رطوبت ۷/۵ درصد خشک کردند. نتايج تحقيق ايشان نشان دادکه افزايش دما تا ۹۳ °C تاثير معني‌داري بر روي مقدار اسيدهاي چرب آزاد و رنگ روغن استحصالي ندارد.

خشك‌کن‌هاي بستر سيال يکي از مناسب‌ترين خشك‌کن‌هاي مورد استفاده براي خشك کردن دانه‌هاي گرانول شکل محصولات کشاورزي داراي رطوبت بالا مي‌باشد که با استفاده از اين خشك کن‌ها عمليات خشك کردن محصولات

E-mail: hgazor@yahoo.com

کشاورزي به صورت يکنواخت و در مدت زمان کوتاهتري نسبت به خشك كن‌هاي مرسوم انجام مي‌گردد (Board, 2000). به منظور بررسي اثر سيال سازي بر خشک شدن گندم در محدوده دمايي ۳۵ تا ۵۸°C يک دستگاه خشک کن آزمايشگاهي با محفظه‌اي به قطر ۱۴۵ و ارتفاع ۱۵۰۰ ميلي‌متر توسط ديامانتيا و همکاران طراحي و ساخته شد (Diamattia et al. , 1996). Amiri Chaijan et al. (۲۰۰۴) در تحقيق خود با استفاده از يک خشک کن بستر سيال وعده‌اي اقدام به خشک کردن محصولات ارزن، جو، شلتوک و سويا نمودند. نتايج تحقيق ايشان نشان دادکه افت فشار و سرعت هوا در نقطه حداقل سيال سازي براي ارزن و سويا به علت کرويت بالا کمتر از شلتوک و جو بود. Turker et al. (۲۰۰۶) نيز در تحقيق خود از خشک کن بستر سيال براي خشک کردن مخمرهاي نانوايي که داراي شکل گرانول هستند، استفاده کردند. در تحقيق ديگري تاثير سيال‌سازي بر فرايند خشک کردن شلتوک در محدوده دمايي ۶۰ تا ۹۰°C انجام شد و نتيجه‌گيري شد که در خشک کردن شلتوک با روش بستر سيال مرحله ثابت خشک کردن بسيار کوتاه بوده و غير قابل اندازه‌گيري مي‌باشد. در اين تحقيق نتيجه‌گيري شد که علاوه بر دما، تاثير ضخامت لايه و سرعت هوا نيز در فرايند سيال‌سازي بسيار حائز اهميت مي باشد (Ng et al., 2006).

فرايند خشک شدن محصولات گندم، ذرت و سويا توسط خشک کن‌هاي بستر سيال نوع جوششي مورد بررسي و ارزيابي قرار گرفته است (Kalwar et al. 1991). Srinivasakannan (۲۰۰۸) در تحقيق خود بر روي مدل سازي فرايند خشک شدن دانه‌هاي خردل با دماهاي ۶۰، ۷۰ و ۸۰°C در خشک کن بستر سيال نتيجه‌گيري کرد که در مقايسه با مدل‌هاي ديگر، مدل پيج داراي برازش بهتري در فرايند خشک شدن خردل بود. داده‌هاي آزمايشي همچنين با استفاده از معادله فيک مدل شد و در محدوده دماهاي آزمايش ضرايب نفوذ رطوبت بين $۱/۶۹\times۱۰^{-۱۱}$ تا $۳/۲۶\times۱۰^{-۱۱}$ m^2/s اندازه‌گيري شد. در تحقيق Bauman et al. (۲۰۰۵) با به کار گيري خشک کن بستر سيال براي خشک کردن انگور، هلو و زردآلو در محدوده دمايي ۷۰ تا ۱۰۰ °C نتيجه‌گيري کردند که افت فشار ايجاد شده در حالت سيال‌سازي به عواملي چون کرويت، رطوبت و جنس ماده بستگي دارد. بررسي سينتيک خشک شدن محصولات ذکر شده در شرايط سيال‌سازي نشان داد که مدل نمايي دو پارامتري داراي توافق خوبي (R=0.99) با داده هاي آزمايش بود. در تحقيق Gazor & Hoseinkhah (۲۰۰۶) نتيجه گيري شد که کاربرد تکنيک سيال‌سازي کلزا در کاهش زمان خشک شدن به خصوص در ۳۰ دقيقه اول فرايند، داراي تاثيري قابل توجه بوده و در بهبود برخي شاخص‌هاي کيفيت روغن استحصالي نظير رنگ و اسيديته نيز موثر مي‌باشد. همچنين برخي شاخص‌هاي ديگر نظير مقدار روغن استخراجي و عدد پراکسيد روغن نيز با سيال‌سازي دستخوش تغيير نمي‌شود. در خشک کردن تک لايه کلزا، با افزايش دماي خشک کردن کلزا از۴۰ به ۶۰°C ضريب نفوذ رطوبت در دانه داراي روندي افزايش بوده و به ترتيب در محدوده $۲/۰۵۶۹۴\times۱۰^{-۸}$ تا $۵/۸۰۶۱\times۱۰^{-۸}$ m^2/s تغيير مي‌کند (Gazor & Minaee, 2008).

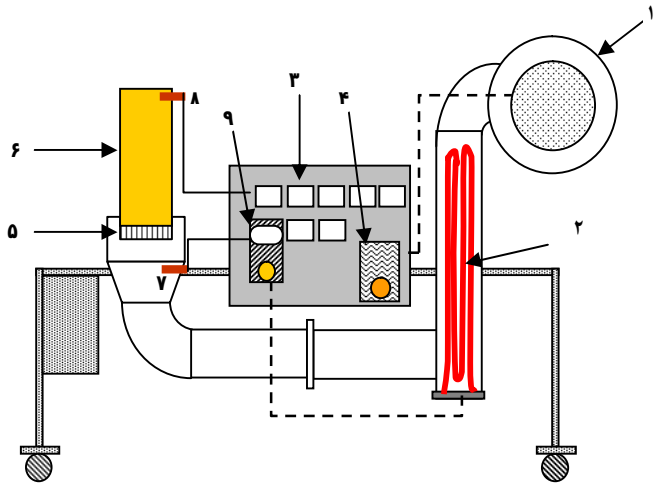
در تحقيق حاضر با استفاده از يك دستگاه خشك كن بستر سيال نوع وعده‌اي، تاثير تغييرات دما بر سينتيک خشک شدن محصول در محدوده ۳۰ تا ۱۰۰°C، بررسي شد. شاخص‌هاي مورد ارزيابي در تحقيق عبارت بودند از بررسي مدل‌هاي سينتيک خشک کردن محصولات کشاورزي و به دست آوردن ضريب نفوذ و انرژي فعال سازي رطوبت دانه‌ها در فرايند خشک کردن کلزا با روش بستر سيال. همچنين در اين تحقيق ارتباط بين زمان خشک شدن کلزا و و تغييرات دما مدل سازي شد.

مواد و روش‌ها

در اين تحقيق تاثير سيال سازي دانه‌هاي کلزا رقم اپرا (*Opera*) در محدوده دمايي ۳۰ تا ۱۰۰ °C بررسي شد. استوانه سيال سازي دستگاه خشک کن (شکل ۱) از جنس استيل و داراي مشخصات قطر داخلي استوانه ۲۰۰ mm، ارتفاع ۳۰۰ mm، ضخامت صفحه مشبک توزيع ۱/۵ mm و داراي سوراخ‌هاي داراي قطر ۵ mm براي انجام آزمايش‌هاي استفاده شد. براي جلوگيري از ريزش محصول به داخل کانال خشک کن از توري نازک در کف استوانه استفاده شد (Srinivasakannan, 2008). توان حرارتي تامين شده در تحقيق نيز توسط سه المنت الکتريکي ۱۰۰۰W وات تامين شد. تغييرات دما براي آزمايش‌هاي در هشت سطح (۳۰ ، ۴۰ ، ۵۰ ، ۶۰ ، ۷۰ ، ۸۰ ، ۹۰ و ۱۰۰ °C) بود.

قبل از شروع هر آزمايش، به منظور جلوگيري از تبادل رطوبت نمونه‌ها با محيط و فسادپذيري، دانه‌هاي برداشت شده در کيسه‌هاي نايلوني در بسته از جنس پلي اتيلن و در دماي ۴°C نگهداري شدند.

در هر آزمايش حدود ۲۲۰۰ g دانه کلزا مشروط شده با رطوبت اوليه حدود (d.b.) ۲۰% با ارتفاع لايه محصول ۱۰۰ mm خشك شد.



شكل۱- طرحواره خشک کن بستر سيال مورد استفاده در تحقيق

در شكل بالا: (۱) دمنده ، (۲) هيترهاي برقي ، (۳) دماسنج ها ، (۴) تنظيم كننده دور موتوردمنده ، (۵) صفحه توزيع كننده جريان هوا ، (۶) محفظه خشک كن ، (۷) سنسور دماي هواي ورودي به محفظه خشک كن ، (۸) سنسور دماي هواي خارج شده از محفظه خشک كن (۹) تنظيم كننده دماي هواي ورودي به محفظه خشک كن

محدوده دما و رطوبت نسبي محيط در زمان آزمايش‌ها به ترتيب ۲۳ تا ۲۵°C و ۳۸ تا ۴۶% اندازه گيري شد. به منظور سيال سازي تيمارهاي آزمايش از مكانيزم تغيير دور دمنده استفاده شد كه با استفاده از باد سنج پره‌اي لوترون (مدل AM-4205) با دقت ۰/۱ m/s سرعت جا به جايي هوا در محفظه خشک كن اندازه‌گيري شد. در واقع شروع سيال سازي با تغيير در فشار استاتيكي بستر محصول حاصل گرديد بعد از زمان آستانه سيال سازي فشار استاتيكي داراي افت محسوسي شد. پس از حالت ذكر شده سيال سازي به وضوح قابل رؤيت خواهد بود (Srinivasakannan, 2008; Bauman et al., 2005).

با ايجاد فركانس ۵۰Hz در تغيير دهنده دور موتور فن سيال سازي مناسب دانه‌ها انجام شد. سرعت هوا در دو حالت ورود به محفظه خشک كن و هم در شرايط وجود محصول در قسمت بالاي استوانه خشک كن، اندازه‌گيري شد (Cubillos and Reyes, 2003; Bauman et. al, 2005). براي تنظيم دما در خشک كن از ترموستات ديجيتال آدنيس با دقت ۱ °C داراي سنسورترموكوپل نوع K استفاده شد. در فرايندهاي خشک كردن متغيرهاي مورد بررسي عبارت بودند از: اندازه‌گيري مدت زمان خشك شدن كلزا براي تيمارهاي مختلف تا متوسط محدوده قابل پذيرش رطوبت دانه‌ها (۶ تا ۸ درصد بر پايه خشک) در نظر گرفته (Anon., 2003; Pagano et al., 1999; Ward et al., 1985). براي اين منظور با استفاده از يک ترازوي ديجيتال ساخت شركت توزين الكتريک TEC-110 با ظرفيت ۱۰۰۰۰ g و دقت ۱g، تغييرات وزن نمونه‌هاي آزمايش در فواصل ۱۵ دقيقه‌اي به صورت ناپيوسته انجام و نتايج ثبت شد (Gazor et al., 2004; Rostami & Mirdamadiha; 2004). پس از مشاهده عدم وجود تغيير در وزن نمونه‌هاي آزمايش و پايان فرايند خشك كردن كلزا، براي هر تيمار در سه تكرار اقدام به نمونه‌گيري شد و نمونه‌ها توسط يك ترازوي ديجيتال ساخت شركت AND مدل 300i و داراي دقت ۰/۰۱ g ± توزين شدند. سپس با استفاده از آون اتمسفريک در دماي ۱۳۰°C به مدت ۳ ساعت هر نمونه به طور كامل خشك و مجدداً توزين شد (Brooker et al. ,1992; Pagano et al. ,1999). پس از آن به وسيله رابطه (۱) مقدار رطوبت هر كدام از نمونه‌ها در پايان فرايند خشك شدن مشخص شد.

$$M_f = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \qquad (۱$$

در اين رابطه:

W_1= وزن نمونه تر(g) W_2= وزن نمونه خشک(g)

M_f = رطوبت نمونه در پايان آزمايش خشك كردن (% d.b)

با ميانگين گيري از سه M_f به دست آمده، رطوبت تيمار آزمايش در پايان فرايند خشك كردن به دست آمد. مشابه با بسياري از تحقيقات انجام شده براي مدل سازي فرايند خشک شدن از نسبت رطوبت $MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$ استفاده شد كه در اين رابطه MR= نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t= رطوبت در لحظه t (kg/kg, d.b)، M_e= رطوبت تعادلي (kg/kg, d.b) و M_o= رطوبت اوليه (kg/kg, d.b) مي‌باشد. (Falade & Abbo,

2007 ; Babalis & Belessiotis, 2004).

به منظور مدل‌سازي نسبت رطوبت(MR) كلزا در فرايند خشک شدن به صورت سيال از مدل‌هاي شناخته شده كه كاربرد زيادي در خشک كردن محصولات مختلف كشاورزي دارند به شرح جدول (۱) استفاده شد (Srinivasakannan,2008; Bauman et al., 2005; Akpinar & Bicer, 2006).

مدل‌هاي رگرسيوني تغييرات نسبت رطوبت در طي خشک شدن، بر اساس متغير مستقل زمان به وسيله نرم‌افزار Statistica حل شد. از سه معيار ضريب تعيين (R^2)، مربع كاي[1] (χ^2) و ريشه متوسط مربع خطاي داده‌ها (RMSE)[2] براي سنجش بهترين مدل استفاده شد كه براي هر مدل هرچه مقدار r^2 بيشتر و χ^2 و RMSE كمتر باشد مدل بهتر است (Akpinar & Bicer, 2006):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(M_{\exp,i} - M_{pre,i})^2}{N-n} \quad (۲)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{I=1}^{n}(M_{pre,i} - M_{\exp,i})^2\right]^{1/2} \quad (۳)$$

در معادلات بالا، $M_{\exp,i}$ رطوبت كلزا مشاهده شده در i امين اندازه‌گيري، $M_{pre,i}$ رطوبت كلزا پيش‌بيني شده از مدل در i امين اندازه‌گيري، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و n تعداد ثابت‌هاي به كار رفته در معادله است.

مقدار ضرايب و ثابت‌هاي مدل‌هاي مورد آزمون در شرايط مختلف آزمايش به روش رگرسيون محاسبه گرديد و بر اساس شاخص‌هاي ارزيابي، مدل مناسب‌تر مشخص شد (Akpinar & Bicer, 2006).

1. Chi-square
2. Root Mean Square Error

جدول ۱- مدلهاي مورد استفاده درخشك شدن توده بستر نازك كلزا

رديف	نام مدل	معادله *
۱	Newton (NM)	$MR = exp(-kt)$
۲	Page (PM)	$MR = exp(-kt^n)$
۳	Henderson and Pabis(HPM)	$MR = a\ exp(-kt)$
۴	Two term exponential (TEM)	$MR = a\ exp(-kt) + (1-a)\ exp(-kat)$
۵	Approximate Diffusion (ADM)	$MR = a\ exp(-kt) + (1-a)\ exp(-kbt)$
۶	Logarithmic (LM)	$MR = a\ exp(-kt) + b$

* MR: نسبت رطوبت، t: زمان (min) a، b، n، و k ثابتهای مدلها می باشند.

در مرحله بعدي براي هر كدام از تيمارهاي آزمايش در ۵۰ تكرار، با استفاده كوليس ورنيه با دقت ۰/۰۲ mm قطر و شعاع ميانگين دانه كلزاي خشک شده را براي هر دما به دست آمد و به شرح جدول (۲) ارائه شد. در نهايت براي تعيين ضريب نفوذ از شعاع‌هاي به دست آمده يک ميانگين كل به دست آمد (Mohsenin, 1970).

جدول ۲- شعاع ميانگين دانه كلزا خشک شده در دماهاي آزمايش

دما (ºC)	(m) d_g	(m) r
۳۰	۰/۰۰۲۰۶	۰/۰۰۱۰۳
٤۰	۰/۰۰۲۰٤	۰/۰۰۱۰۲
۵۰	۰/۰۰۱۹۸	۰/۰۰۰۹۹
٦۰	۰/۰۰۱۹٤	۰/۰۰۰۹۷
۷۰	۰/۰۰۱۹۰	۰/۰۰۰۹۵
۸۰	۰/۰۰۱۸٦	۰/۰۰۰۹۳
۹۰	۰/۰۰۱۸۲	۰/۰۰۰۹۱
۱۰۰	۰/۰۰۱۸۰	۰/۰۰۰۹

سپس به منظور تعيين ضريب نفوذ رطوبت از حل معادله فيک براي اجسام كروي شكل به شرح رابطه (۴) استفاده شد (Mujumdar, 2000 ; Falade & Abbo, 2007 ; Babalis & Belessiotis, 2004).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2}\exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff}\, t}{r^2}\right] \quad (۴)$$

در اين معادله:

MR= نسبت رطوبت (بدون بعد)

M_t= رطوبت در لحظه t (kg/kg, d.b.)

M_e= رطوبت تعادلي (kg/kg, d.b.)

M_o= رطوبت اوليه (kg/kg, d.b.)

D_{eff}= ضريب نفوذ (m^2/s)

t= زمان (s)

r= شعاع كره (m)

از طرفين معادله (۴) لگاريتم گرفته مي‌شود.

$$\ln\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \ln\frac{6}{\pi^2} - \frac{D_{eff}\,\pi^2 t}{r^2} \quad (۵)$$

با استفاده از ضريب زاويه خط ترسيم شده داده‌هاي $\ln\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$ بر حسب زمان (ثانيه) و شعاع ميانگين هر دانه ضريب نفوذ (D_{eff}) مربوطه به دست خواهد آمد. با توجه به تابعيت ضريب نفوذ با دما، براي تعيين انرژي فعال سازي رطوبت از رابطه آرينيوس (۶) استفاده شد (Falade & Abbo, 2007; Mujumdar, 2000).

$$D_{eff} = D_o \exp\frac{-E_a}{RT} \qquad (۶$$

در اين رابطه:

D_{eff}= ضريب نفوذ (m^2/s)

D_o= ضريب نفوذ در دماي مبنا (m^2/s)

E_a = انرژي فعال سازي (kJ/ mol)

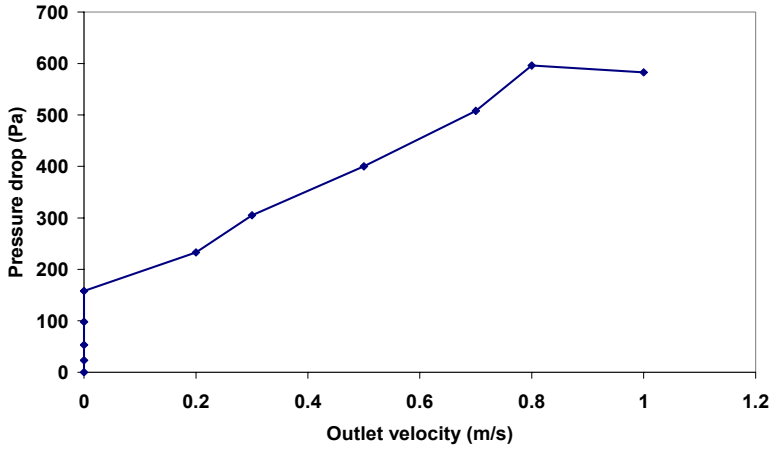
R= ثابت جهاني گازها (0.008314 kJ/mol.K)

T= دما (K)

به منظور به دست آوردن يک رابطه بين دماهاي آزمايش و زمان خشک شدن کلزا، با استفاده از روش حداقل مربعات و مدل‌هاي رگرسيوني تاثير دما بر زمان خشک شدن کلزا در محدوده دمايي ۳۰ تا ۱۰۰ ºC مدل سازي شد.

نتايج و بحث

همان گونه که انتظار مي‌رفت فشار استاتيکي هوا در زير توده محصول واقع در خشک کن تا زمان آستانه سيال سازي روندي افزايشي داشته و پس از آن با سيال شدن محصول افت فشار استاتيکي ملاحظه گرديد. منحني مشخصه سيال سازي کلزا در شکل (۲) نشان مي‌دهد که بعد از زمان آستانه سيال سازي (نقطه A) فشار استاتيکي داراي افت محسوسي شد و از ۵۹۶ در نقطه A به ۵۸۳ Pa تنزل پيدا کرد. پس از حالت ذکر شده سيال سازي به وضوح قابل رويت گرديد (Srinivasakannan, 2008; Bauman et al., 2005).



شکل ۲- تغييرات فشاراستاتيکي توده محصول به ازاء سرعت‌هاي هواي خروجي حين فرايند سيال سازي

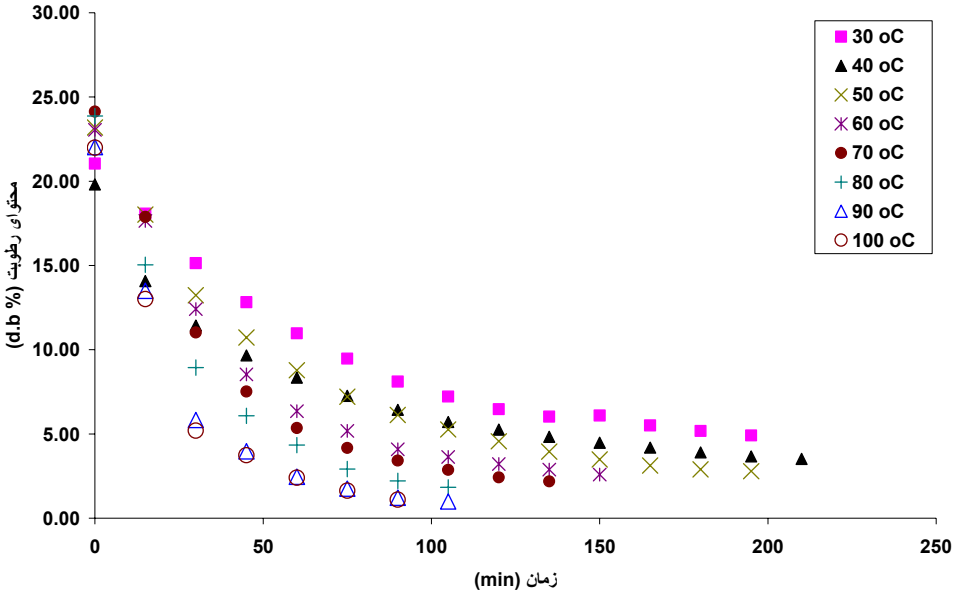
به هنگام سيال‌سازي مناسب دانه‌ها سرعت هوا در قسمت بالاي استوانه خشک کن، در حدود ۱ m/s اندازه‌گيري شد (Cubillos & Reyes, 2003; Bauman et. al, 2005). لازم به ذکر است سرعت جا به جايي هواي خروجي براي دستيابي به آستانه سيال سازي دانه‌هاي کلزا، حدود ۰/۸ m/s بود که با ادامه افزايش سرعت هوا، مرحله حباب سازي شروع، پس از آن سيال سازي دانه‌هاي کلزا انجام شد. با افزايش بيشتر سرعت هوا منجر به انتقال دانه‌ها شد که در اين حالت سرعت هواي خروجي به ۱/۴m/s رسيد.

در خشک کن بستر سيال به دليل توزيع يکنواخت جريان هواي گرم از ميان توده محصول، مرحله خشک شدن با نرخ ثابت بسيار سريع و گذرا بوده و در بسياري از موارد نامحسوس مي‌باشد. لذا خشک شدن محصول داراي روندي سريعتر بوده و يکنواختي بيشتري در محصول خشک شده ملاحظه گرديد. همان گونه که در شکل (۳) مشخص مي‌باشد افزايش دما در حالت سيال‌سازي تاثير بيشتري بر روي کاهش زمان خشک شدن داشته است.

افزايش دما به دليل بالا رفتن ظرفيت هوا براي جذب رطوبت و نيز افزايش انرژي فعال سازي براي دفع رطوبت از ماده موجب تبادل سريع رطوبت و کاهش قابل توجه زمان خشک شدن بين تيمارهاي آزمايش شده است. اين تاثير در دماي ۱۰۰ ºC بسيار بارز بوده و زمان خشک شدن را ۷۵% نسبت به دماي ۳۰ºC کاهش مي‌دهد. اين تاثير نسبت به دماهاي کمتر از ۶۰ ºC بارزتر مي‌باشد (جدول ۳). مشابه اين نتايج در خشک کردن لايه نازک کلزا نيز مشاهده گرديد و افزايش دما از ۴۰ به ۵۰ و از ۵۰ به ۶۰ºC به ترتيب ۳۵/۶ و ۴۷/۷ درصد زمان خشک شدن را کاهش داد (Gazor & Minaee, 2008).

در تمام دماهاي آزمون شده، بيشترين تغييرات در منحني‌هاي آهنگ خشک شدن (شکل۴) مربوط به زمان‌هاي اوليه خشک کردن يعني محدوده زماني ۰ تا ۵۰ دقيقه مي‌باشد که رطوبت

اوليه با سرعت زياد از ماده جدا مي‌شود. بعد از دقيقه ۵۰ با توجه به كاهش رطوبت در دانه‌ها به تدريج شيب منحني خشك شدن كاهش يافته و در مراحل انتهايي با توجه به رطوبت باقي مانده در دانه‌ها به صورت افقي در مي‌آيد.

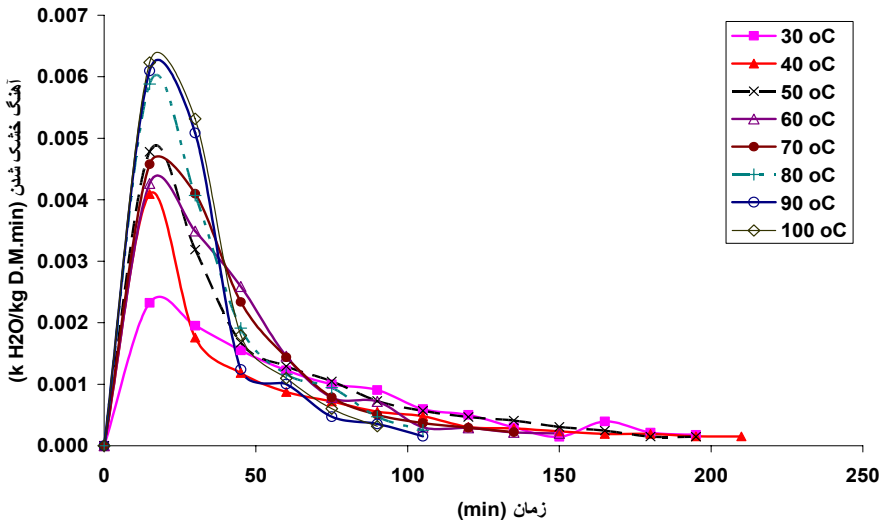


شكل ۳- تاثير دما بر روند تغييرات رطوبت كلزا در خشك كن بستر سيال

جدول ۳- تاثير دما بر متوسط زمان خشك شدن كلزا (min) *

تغييرات دما (°C)	۳۰	٤۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
متوسط زمان خشك شدن (min)	۱۱۵/۰	۸۵/۰	۷۵/۳	۵۷/۷	۵۱/۳	۴۳/۷	۳۴/۳	۲۹/۷

* متوسط زمان خشك شدن دانه ها تا محدوده رطوبتی ۸- ۶ درصد بر پايه خشك محاسبه شده است.



شكل۴- تاثير تغييرات دما بر آهنگ خشك شدن كلزا در خشك كن بستر سيال

با توجه به شاخص‌هاي مورد ارزيابي مندرج درجدول (۵)، ملاحظه مي‌شود كه مدل‌هاي ADM و TEM به ترتيب نسبت به مدل‌هاي ديگر داراي برازش بهتري بودند. اما با توجه به اختلاف‌هاي ناچيز در شاخص‌هاي مورد ارزيابي براي هر مدل، كاربرد مدل ساده‌تر در تخمين روند تغييرات نسبت رطوبت كلزا قابل توصيه مي‌باشد. در بين مدل‌هاي بكار رفته مدل نيوتن (NM) داراي ساده‌ترين شكل و كمترين ضريب مي‌باشد. با توجه به ضريب تعيين و شاخص‌هاي ارزيابي ديگر مي‌توان كاربرد اين مدل را براي خشك كردن كلزا در حالت بستر سيال توصيه نمود.

جدول ۵- ارزيابي مدل هاي مورد آزمون در تحقيق

مدل‌هاي مورد آزمون	شاخص ها وضرايب مربوط به هر مدل						
	R^2	X^2	RMSE	k	n	a	b
NM	۰/۹۹۶۶	۰/۰۰۰۲۸۰	۰/۰۱۶۱۶۳	۰/۰۲۷۷۳۷	-	-	-
PM	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۰۲۳۰	۰/۰۱۴۱۱۶	۰/۰۳۵۵۶۴	۰/۹۳۴۵۴۱	-	-
HPM	۰/۹۹۶۶	۰/۰۰۰۲۲۹	۰/۰۱۶۰۹۶	۰/۰۲۷۵۹۵	-	۰/۹۹۴۸۴۸	-
TEM	۰/۹۹۸۱	۰/۰۰۰۱۶۶	۰/۰۱۱۹۸۲	۰/۰۴۰۳۶۴	-	۰/۴۹۹۸۶۴	-
ADM	۰/۹۹۸۴	۰/۰۰۰۱۵۲	۰/۰۱۱۰۰۹	۰/۰۳۲۴۷۶	-	۰/۸۶۷۹۳۸	۰/۳۵۴۲۴۱
LM	۰/۹۹۵۱	۰/۰۰۰۳۱۲	۰/۰۱۶۵	۰/۰۳۵۴۵۱	-	۰/۸۳۵۴۱۴	۰/۱۷۹۳۱۹

براساس تجزيه و تحليل مدل رگرسيوني نيوتن، ثابت k به صورت تابعي از دما (T) بر حسب درجه سلسيوس در خشک کن بستر سيال به صورت معادله (۷) ارائه مي شود:

$$k = 0.0004 \times T + 0.0029 \qquad R^2 = 0.975 \qquad (۷)$$

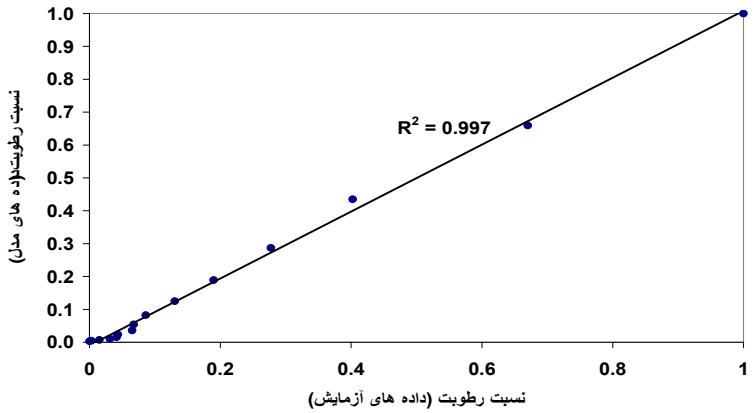
لذا با قرار دادن ضرايب و ثابت‌ها به صورت تابعي از دماي خشک کن بستر سيال، مدل نهايي نسبت تغييرات رطوبت در خشک شدن کلزا بر اساس مدل نيوتن به شرح ذيل بدست مي‌آيد:

$$MR = \exp(-(0.0004 \times T + 0.0029) \times t) \qquad (۸)$$

مدل ارايه شده را مي‌توان براي خشک کردن کلزا در شرايط بستر سيال با تخمين مناسب به کار برد. سازگاري مدل با داده‌هاي آزمايشگاهي براساس شاخص‌هاي ارزيابي R^2=۰/۹۹۶۶، RMSE=۰/۰۱۶۱۶۳ و χ^2=۰/۰۰۰۲۸، مورد قبول است.

همان گونه که در شکل (۵) مشخص مي‌باشد مدل نيوتن داراي دقت مناسبي در تخمين نسبت رطوبت کلزا در خشک کردن به روش بستر سيال در محدوده دمايي ۳۰ تا ۱۰۰ °C دارا مي‌باشد.

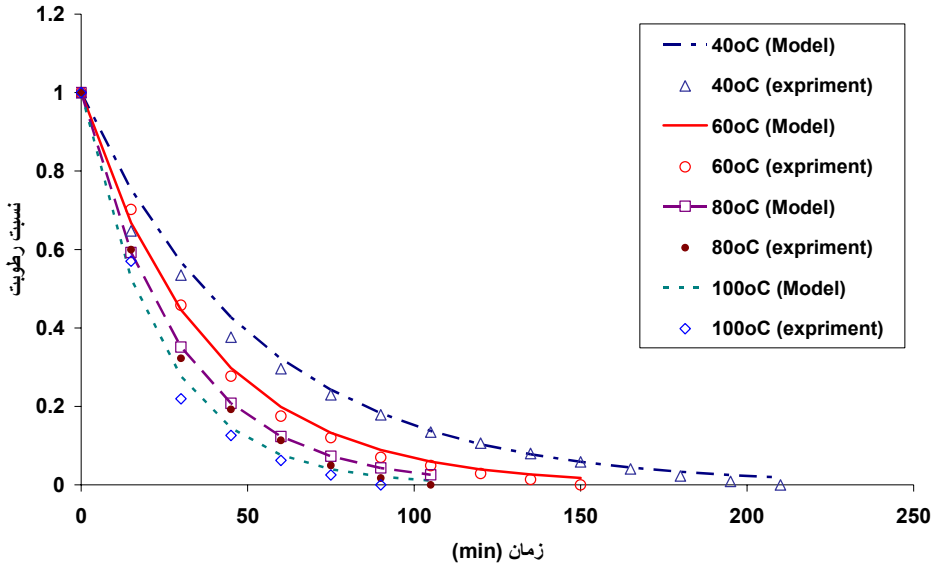
شاخص‌ها و ضرايب مربوط به مدل نيوتن براي دماهاي مورد آزمون به شرح جدول ۶ مي‌باشد:



شکل ۵- مقادير نسبت رطوبت آزمايشي و مدل نيوتن در فرايند خشک کردن کلزا

جدول ۶- شاخص‌ها و ضرايب مربوط به مدل نيوتن براي دماهاي مورد آزمون

دما (°C)	R^2	χ^2	RMSE	k
۳۰	۰/۹۹۲۹	۰/۰۰۲۱۸۶	۰/۰۴۵۱۷۱	۰/۰۱۷۱۶۱
۴۰	۰/۹۹۰۵	۰/۰۰۱۵۶۸	۰/۰۳۸۲۵۸	۰/۰۲۱۰۸۱
۵۰	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۰۲۹۸	۰/۰۱۶۶۶۷	۰/۰۲۱۸۲۳
۶۰	۰/۹۹۷۰	۰/۰۰۰۲۵۰	۰/۰۱۵۲۹۰	۰/۰۲۷۵۳۰
۷۰	۰/۹۹۲۱	۰/۰۰۰۶۳۱	۰/۰۲۴۲۷۵	۰/۰۲۹۹۲۸
۸۰	۰/۹۹۸۱	۰/۰۰۰۲۱۹	۰/۰۱۴۲۹۹	۰/۰۳۶۸۵۲
۹۰	۰/۹۹۱۹	۰/۰۰۰۷۴۶	۰/۰۲۶۷۱۰	۰/۰۴۲۵۹۲
۱۰۰	۰/۹۹۰۲	۰/۰۰۰۶۹۷	۰/۰۲۵۵۰۵	۰/۰۴۵۷۰۳



شكل ۶ - مقايسه روند تغييرات نسبت رطوبت در مدل و آزمايش براي برخي دماها

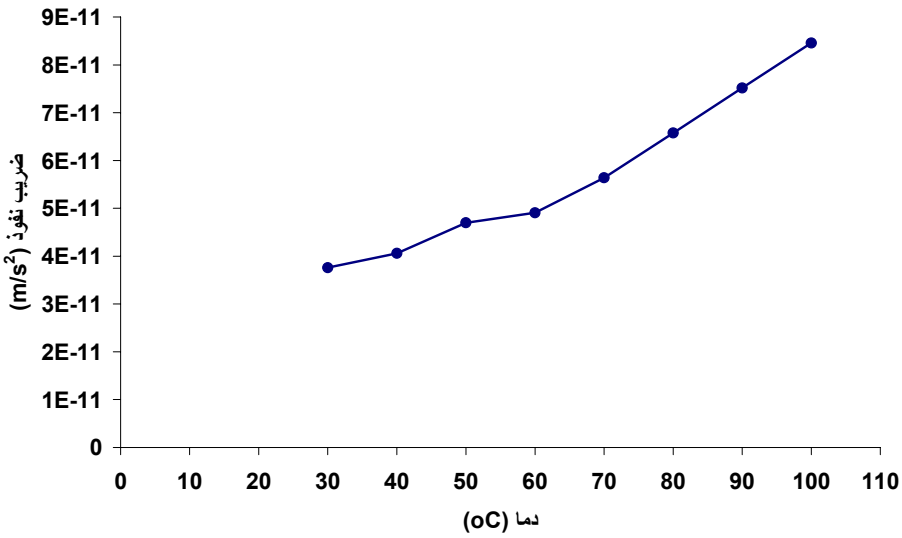
به عنوان نمونه براي دماهاي ۴۰ ، ۶۰ ، ۸۰ و ۱۰۰ ºC ، مقايسه روند تغييرات نسبت رطوبت نمونه‌هاي آزمايشي و مدل به دست آمده در شكل ۶ نمايش داده شده است.

تغييرات ضريب نفوذ موثر رطوبت در تيمارهاي تحقيق در شكل۷ نشان داده شده است. همان گونه كه در اين شكل ملاحظه مي‌گردد با افزايش دما در فرايند خشك شدن دانه‌هاي كلزا، ضريب نفوذ موثر رطوبت يک روند افزايشي دارد. در فرآيند خشک کردن کلزا با روش بستر سيال محدوده دمايي۳۰ تا ۱۰۰ ºC ضريب نفوذ رطوبت كلزا از $۳/۷۵۹\times۱۰^{-۱۱}$ تا m^2/s $۸/۴۵۷\times۱۰^{-۱۱}$ تغيير مي‌كند. دليل وقوع اين مسئله تاثير بارز دما در ايجاد جنبش ملكولي و مكش سطحي بيشتر و افزايش ضريب مذكور به ميزان بيش از دو برابر مي‌باشد. مشابه با نتايج به دست آمده در ساير تحقيقات انجام شده در مورد ديگر محصولات كشاورزي هم ملاحظه مي‌گردد (Gazor & Minaei, 2008; Srinivasakannan,2008 ; Mujumdar, 2000).

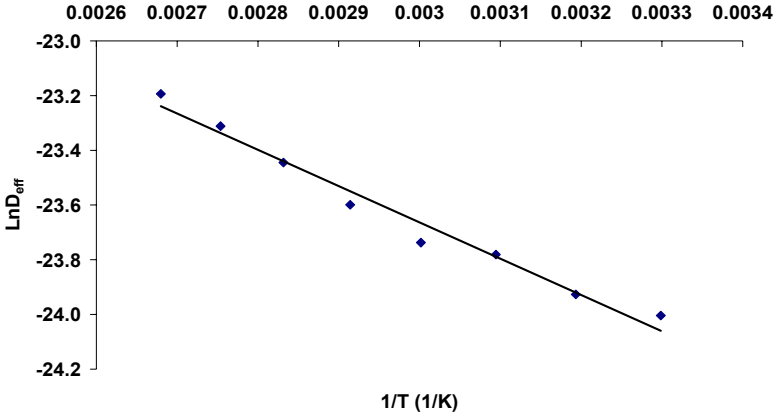
با استفاده از ضرايب نفوذ رطوبت به دست آمده رابطه بين $\ln(D_{eff})$ و $1/T$ (شكل ۸) به صورت معادله خطي زير ملاحظه مي‌گردد.

$$\ln D_{eff} = 1326.5\left(\frac{1}{T}\right) \quad 19.684 \qquad R^2=0.977 \qquad (۹$$

با استفاده از ضريب زاويه به دست آمده و قرار دادن آن در رابطه آرينيوس، انرژي فعال سازي نفوذ پذيري رطوبت در كلزا در ۱۱/۰۳ kJ/.mol بدست آمد.



شكل ۷ - روند تغييرات ضريب نفوذ موثر رطوبت كلزا در دماهاي مختلف



شكل ۸- روند تغييرات $\ln(D_{eff})$ بر حسب 1/T

به منظور تخمين زمان خشک شدن کلزا تا رطوبت مناسب (۶ تا ۸ درصد بر پايه خشک) در خشک کن بستر سيال از داده هاي آزمايشات و معادله رگرسيون نمايي ذيل استفاده شد.

$$t = a\exp(-bT) \qquad (۱۰$$

در رابطه بالا t زمان خشک شدن بر حسب (min) ، T دماي خشک کردن (ºC) ، b و a ضرايب ثابت مي باشند.

با قراردادن مقادير به دست آمده براي ثابتهاي a و b ، معادله تخمين زمان خشک شدن کلزا در محدوده دمايي ۳۰ تا ۱۰۰ ºC به شرح زيل بدست آمد .

$$t = 189.52\exp(-0.0188T) \quad R^2=0.991 \qquad (۱۱$$

با توجه به مدل مورد استفاده، جدول (۷) براي تخمين زمان خشک شدن کلزا در خشک کن بستر سيال ارائه مي گردد.

جدول ۷- تخمين زمان خشک شدن کلزا در بستر سيال با استفاده از مدل

دما (ºC)	پيش بيني زمان خشک شدن (min)
۳۰	۱۰۷/۸
۴۰	۸۹/۳
۵۰	۷۴/۰
۶۰	۶۱/۳
۷۰	۵۰/۸
۸۰	۴۲/۱
۹۰	۳۴/۹
۱۰۰	۲۸/۹

نتيجه گيري

از اجراي اين تحقيق نتيجه‌گيري شد که شروع سيال‌سازي با کاهش فشار استاتيکي در زير توده محصول ايجاد مي‌شود. بعد از زمان آستانه سيال‌سازي فشار استاتيکي داراي افت محسوسي شد و از ۵۹۶ Pa در شروع سيال سازي به ۵۸۳ Pa تنزل پيدا کرد. در اين حالت سيال سازي به وضوح قابل رويت بود. هنگام سيال سازي مناسب دانه‌ها سرعت هوا در قسمت بالاي استوانه خشک کن، حدود ۱ m/s اندازه‌گيري شد. افزايش دما در حالت سيال‌سازي تاثير بهينه بر روي کاهش زمان خشک شدن داشته است. افزايش دما از ۳۰ به ۱۰۰ ºC زمان خشک شدن کلزا را ۷۴% کاهش داد. در بررسي سينتيک خشک شدن کلزا در خشک کن‌هاي بستر سيال مدل‌هاي ADM و TEM به ترتيب نسبت به مدل‌هاي ديگر داراي برازش بهتري بودند. اما با توجه به اختلاف‌هاي ناچيز در شاخص‌هاي مورد ارزيابي براي هر مدل، و ضرايب کمتر کاربرد مدل مدل نيوتن (NM) در تخمين روند تغييرات نسبت رطوبت کلزا در حالت بستر سيال قابل توصيه مي‌باشد. با افزايش دما در فرايند خشک شدن دانه‌هاي کلزا، ضريب نفوذ موثر رطوبت يک روند افزايشي دارد. در فرآيند خشک کردن کلزا با روش بستر سيال محدوده دمايي۳۰ تا ۱۰۰ ºC ضريب نفوذ رطوبت کلزا از $۳/۷۵۹\times۱۰^{-۱۱}$ تا $۸/۴۵۷\times۱۰^{-۱۱}$ m^2/s بر ثانيه تغيير مي‌کند. در اين تحقيق با استفاده از رابطه آرينيوس، انرژي فعال سازي نفوذپذيري رطوبت در کلزا ۱۱/۰۳ kJ/mol به دست آمد. به منظور تخمين زمان خشک شدن کلزا تا رطوبت مناسب (۶ تا ۸ درصد بر پايه خشک) در خشک کن بستر سيال معادله نمايي ارزيابي شده برازش مناسبي با داده‌هاي آزمايش نشان داد.

REFERENCES

Ahmadi, M.R. & Javidfar, F. (1998) Nutrition of the oil rape crop. Oil seed cultivation developing Co.:17-18.

Akpinar, E. K. & Bicer, Y. (2006) Mathematical Modeling and Experimental Study on Thin Layer Drying of Strawberry. *International Journal of*

Food Engineering, Vol. 2 , Iss. 1, Art 5.

Amiri Chayjan, R., Khoshtaghaza, M. H. & Kianmehr, M. H. (2004). Design principles of experimental fluidized bed dryer for some agricultural products. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 5, No 20 : 35-52.

Anonymous, (2003). *Canola production instruction in different climate of Iran*. Oil seeds department, Seed and Plant improvement institute (annual report).

Anonymous (2006) statistical report of cultivation year 2004 – 2005. *Agricultural Jihad ministry of Iran*. Vol 1, 271 pages.

Azizi, M., Soltani, M. & Khavari Khorasani, S. (1999). *Brassica oil seeds* (production) Jihad Daneshghahi Mashhad perss: 57-58.

Babalis, S. J. & 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.

Bauman, I., Bobic, Z., Dakovic, Z. & Ukrainczyk, M. (2005). Time and speed of fruit drying on batch fluid beds. SADHANA, Academy proceeding in *engineering sciences*. Vol. 30, part 5: 687-698

Board, N. (2000). *The complete technology book on processing, dehydration, canning, preservation of Fruits and vegetables*. NIIR publication division, India.

Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W. & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. An AVI book, Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A.

Cubillos, F. & Reyes, A. (2003). Drying of carrots in a fluidized bed. II. Design of a model based on a modular neural network approach. *Drying Technology*, Vol 21, No. 7 : 1185-1196.

Diamattia, D. G., Amyotte, P. R. & Hamdullahpur, F. (1996). Fluidized bed drying of large particles. *Transactions of the ASAE*. 39(5): 1745-1750.

Falade, K. O., & Abbo, E. (2007). Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera L.*) fruits. *Journal of Food Engineering*, 79, 724–730.

Gazor, H. R., Minaee, S. & Rostammi, M. A. (2005). Influence of temperature and thickness on pistachio drying in batch dryers. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*., Vol. 11(4):81-94.

Gazor, H. R. & Hosienkhah, R. (2006). Assessment of Canola drying process and produced oil characteristics using fluidized bed dryer. Report No: 85/792. *Agricultural Engineering Research Institute*. Karaj, Iran., 50 pages.

Gazor, H. R & Minaee, S. (2008). Influence of temperature and air velocity on the Canola drying process and its quality. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 9, No 1 : 109-124.

Kalwar M.I., Kudra T., Raghavan G.S.V. & Mujumdar A.S. (1991). Drying of grains in a drafted two-dimensional spouted bed. *J. Food Process Eng*. 13: 321-332.

Mohammadzadeh, J., Familmomen, R. & Maftoon Azad, N. (2004). Study of dehulling methods of Colza (Canola) and its effects on oil quality and quantity. Report No: 83/1466. Agricultural Engineering Research Institute. Karaj, Iran. 31 pages.

Mohsenin Nuri N. (1970). *Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science* Pub. New York, USA.

Morison, W.H. & Roberson, J.S. (1978). Oil point in technology estimation of dried rapeseed. *J. Am. Chem. Soc*. 55(2): 272-274.

Mujumdar, Arun S. (2000) *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*. Science publisher, Inc. Enfield (NH), USA.

Ng, P.P , Law, Ch. L. & Tasirin, S. M. (2006) Drying Kinetics of Malaysian Paddy (Group D Particles) in Spouted Bed Dryer. *International Journal of Food Engineering*, Vol. 2 , Iss. 3, Art. 1

Pagano A. M., Rovhein, C. A. & Crozza, D. E. (1999). Drying in bin of rapeseed with near ambient air. Proceeding of the 10th *international rapeseed congress*, Canberra, Australia.

Rostami, M. A. & Mirdamadiha, F. (2004) Evaluation and comparison of current pistachio dryers in Kerman province. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 5, No 18 : 1-18.

Srinivasakannan, C. (2008) Modeling Drying Kinetics of Mustard in Fluidized Bed. *International Journal of Food Engineering*, Vol. 4, No. 3, Article 6, (1-14).

Turker M. , Kanarya, A., Y¨uzgec¸ U., Kapucu, H., & Senalp, Z. (2006). Drying of baker's yeast in batch fluidized bed Chemical Engineering and Processing 45 (2006) 1019–1028

Ward J. T., Basford, W. D., Hawkins, J. H. & Holliday, J. M. (1985). Oilseed rape. Farming press LTD, Norwich.