

مدل سازی ریاضی سینتیک خشک کردن لایه‌ی نازک فلفل دلمه‌ای

بهشته شعبانی^{۱*}، حمید توکلی پور^۲

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار، سبزوار، ایران

^۲ استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار، سبزوار، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۶/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۱۰

چکیده

در این تحقیق، بعد از خشک کردن فلفل دلمه‌ای توسط خشک کن هوای داغ در دماهای ۷۰، ۶۰ و ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد پارامترهای سینتیکی خشک کردن بررسی شد. نتایج، نشان داد دمای ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد است بالاترین سرعت خشک کردن و کم‌ترین زمان خشک کردن را دارا می‌باشد. همچنین، میزان چروکیدگی با افزایش دما، افزایش یافت و در دمای ۸۰ بالاترین چروکیدگی مشاهده گردید. میزان بازآپوشی با افزایش دما کاهش یافت و در دمای ۶۰ به علت کاهش تخریب لوله‌های موئین بالاترین میزان بازآپوشی مشاهده گردید. بر اساس نتایج با افزایش دما میزان انتشار رطوبت افزایش یافت و انرژی اکتیواسیون $34/577 \text{ kJ/mol}$ محاسبه گردید. مدل‌سازی بر اساس ۱۱ مدل ریاضی سینتیکی استاندارد بر داده‌های تجربی برازش داده شد و ارزیابی مدل‌ها از طریق چهار معیار ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، کاهش کای اسکوار (X^2) و خطای انحراف میانگین (MBE) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بررسی نتایج، نشان داد که مدل تقریبی انتشار در دمای خشک کردن ۶۰ و ۸۰ و مدل ورم و همکاران در دمای خشک کردن ۷۰ مراحل خشک کردن فلفل دلمه‌ای را بهتر ارزیابی می‌کند. بنابراین، این دو مدل برای پیش‌بینی تغییرات رطوبت و کیفیت بالای محصول در فرایند خشک کردن فلفل دلمه‌ای به روش جابه‌جایی هوای داغ مناسب تشخیص داده شد.

واژه‌های کلیدی: مدل سازی ریاضی لایه‌ی نازک، خشک کردن فلفل دلمه‌ای، ضریب نفوذ، انرژی

اکتیواسیون، چروکیدگی.

۱- مقدمه

فلفل دلمه‌ای نوعی فلفل از خانواده *Solanaceae* با نام علمی *Capsicum annuum* که به رنگ‌های قرمز، زرد، سبز، نارنجی و به ندرت به رنگ سفید، بنفش، آبی، سیاه و قهوه‌ای یافت می‌شود (۵، ۲۴، ۲۹، ۳۶). این گیاه به عنوان سبزیجات یا حتی به صورت دارویی مصرف می‌شود و با توجه به وارسته و محل رویش نام‌های مختلفی دارد. مردم اندونزی و آلمان آن را با نام پاپریکا^۱ می‌شناسند و فرانسوی‌ها به آن پیرون^۲ می‌گویند در حالی که در پرتغال با نام پیمنتو یا پیمنتا^۳ شناخته شده است. (۵) مهم‌ترین ترکیبات رنگی فلفل کاروتنوئیدها و کاروتنوئید استرازاها می‌باشند. (۲) این گیاه، بومی مکزیک و آمریکای مرکزی است و مکزیک و پرو اولین کشورهای بودند که کاشت این گیاه را رواج دادند. کشور های مصرف کننده فلفل، آمریکای شمالی، اروپا، چین و هند هستند. فلفل دلمه‌ای متعلق به تیره‌ی سیب زمینی سانان است که دارای گل‌های سفید رنگ است و به تنهایی روی ساقه قرار دارند و میوه‌های حاصل از آن‌ها به صورت جدا از هم روی ساقه قرار دارند. اهمیت فیزیولوژیکی این گیاه بر اساس خاصیت اشتهاآوری آن، هضم غذا، مقدار کاروتین و به ویژه ویتامین C است. کاروتین و ویتامین P موجود در این گیاه در تنظیم فشار خون بسیار موثرند. (۱، ۳۴). فلفل‌ها منبع مواد معدنی از قبیل کلسیم، فسفر، پتاسیم و آهن می‌باشند (۲۱). هر ۱۰۰ گرم از فلفل دلمه‌ای دارای ۹۳/۸۹ گرم آب، ۰/۸۶ گرم پروتئین، ۰/۱۷ گرم چربی، ۰/۴۳ گرم خاکستر، ۶/۶۴ گرم کربوهیدرات، ۲/۴۰ گرم ساکارز و ۱/۷۰ گرم فیبر، ۲۰ کیلو کالری انرژی می‌باشد. در هر ۱۰۰ گرم از بخش خوراکی فلفل دلمه‌ای مواد معدنی با اهمیتی از قبیل کلسیم (۱۰ میلی‌گرم)، پتاسیم (۱۷۵ میلی‌گرم)، فسفر (۲۰ میلی‌گرم)، آهن (۰/۳۴ میلی‌گرم) و اسکوربیک اسید یا ویتامین C (۸۰/۴ میلی‌گرم) و ویتامین A (۳۷۰ میلی‌گرم) موجود می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین روش‌های نگه‌داری مواد، خشک کردن آن‌ها می‌باشد که باعث کاهش فعالیت آبی و کاهش میزان رطوبت ماده‌ی غذایی شده و در نتیجه، زمان ماندگاری افزایش می‌یابد. این کار را می‌توان توسط خشک‌کن خورشیدی، هوای داغ، انجمادی و روش اسمزی انجام داد. کاهش رطوبت و عوامل

وابسته به شدت آن بر انتخاب مدل مناسب اثرگذار می‌باشد (۵). دویماز (۲۰۰۴) لایه‌های نازک هویچ به ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر را در چهار دمای ۵۰، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با سرعت ۰.۵ تا ۱.۵ متر بر ثانیه به وسیله‌ی خشک‌کن آزمایشگاهی خشک کرد. مدل پیچ نسبت به مدل هندرسون و پاپیس نتیجه‌ی بهتری را نشان داد (۱۱). دویماز و اسماعیل (۲۰۱۰) ویژگی‌های خشک کردن گیلاس را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، تاثیر امولسیون‌های قلیایی و اتیل اولئات روی ویژگی‌های خشک کردن گیلاس در چهار سطح دمایی ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. مدل پیچ به عنوان بهترین مدل برای توصیف ویژگی‌های خشک کردن گیلاس ارائه گردید. جان روبرت (۲۰۰۸) سینتیک خشک کردن انگور را مورد بررسی قرار داد. نتایج، نشان داد که مدل لوپس ویژگی‌های خشک کردن دانه‌ی انگور را به طور مطلوب‌تری توصیف می‌نماید (۲۷).

هدف از این تحقیق، ارائه‌ی مناسب‌ترین مدل برای خشک کردن فلفل دلمه‌ای بود تا بتوان بر اساس الگوی به دست آمده از مدل، روند خشک کردن محصول را پیش‌بینی نمود. برای این منظور، مدل‌های دینامیکی خشک کردن لایه‌ی نازک محصولات کشاورزی بر روی فلفل دلمه‌ای شبیه‌سازی گردید و در نهایت، بهترین مدل بر اساس پارامترهای مورد بررسی تعیین گردید. مدل‌های مذکور بر اساس متغیرهای وابسته (رطوبت برش‌ها) و متغیرهای مستقل (زمان و دمای خشک کردن) بر داده‌های تجربی برازش داده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده‌سازی نمونه

در این تحقیق، فلفل دلمه‌ای سبز رنگ (کاپسیکوم آنوم) از بازار محلی در شهر اسفراین خریداری شد. برای خشک کردن، قبل از شروع آزمایش‌ها شسته شد و قسمت سر و انتهای آن جدا شدند و از قسمت وسط آن برای نمونه برداری استفاده شد. قسمت وسط فلفل دلمه‌ای به وسیله‌ی چاقوی تیز به صورت تکه‌هایی به طول ۱۵ mm و عرض ۱۰ mm و ضخامت 2 ± 0.5 mm برش داده شدند. لازم به ذکر است که ضخامت برش‌ها توسط کولیس کنترل می‌شد. برای بررسی پارامترهای سینتیکی و رسم منحنی‌های مربوطه ۱۰ گرم فلفل دلمه‌ای قطعه‌قطعه شده توزین و سپس درون پلیت قرار داده شد پلیت‌ها به خشک‌کن جابه‌جایی هوای

1- Paprika
2- Poivron
3- Pimento or pimentao

گیری حجم برای هر سه نمونه‌ی خشک شده دردمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد صورت گرفت و چروکیدگی با استفاده از معادله‌ی (۳) محاسبه گردید (۱۴).

$$SH = \frac{\Delta V}{\Delta V_0} * 100 \quad (3)$$

ΔV = جابجایی حجم در فلفل خشک شده

ΔV_0 = جابجایی حجم در فلفل تازه

۲-۴- باز آبیوشی

برای اندازه گیری نسبت آبیگری مجدد ۱ گرم از نمونه های خشک شده را در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر در دمای محیط غوطه ور شد. در فواصل زمانی مشخص تا رسیدن به تعادل که ۶ ساعت به طول انجامید. نمونه ها از آب مقطر خارج شده و پس از حذف رطوبت سطحی به کمک کاغذ صافی، توزین شدند. سپس، نسبت آبیگری مجدد با استفاده از معادله‌ی (۴) محاسبه گردید. (۲۹، ۳۸).

$$RR = \frac{M_{AR}}{M_{BR}} \quad (4)$$

M_{BR} وزن قبل از آبیگری (g)

M_{AR} وزن بعد از آبیگری (g)

۲-۵- مدل های ریاضی فرآیند خشک کردن

در این تحقیق، نسبت رطوبت نمونه های فلفل دلمه‌ای توسط معادله‌ی زیر محاسبه گردید:

(۵)

$$R = \frac{m_t - m_g}{m_0 - m_g}$$

در این معادله، m_t مقدار رطوبت در زمان t ، m_0 مقدار رطوبت اولیه، m_g مقدار رطوبت تعادلی می باشد. با توجه به این که مقدار M_0 نسبت به M و M_0 ناچیز می باشد معادله‌ی فوق را می توان به صورت زیر تغییر داد:

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (6)$$

نمونه‌ها در سه دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در خشک کن هوای داغ خشک گردید. در این تحقیق، رفتار کاهش رطوبت با گذشت زمان مورد مطالعه قرار گرفت. مدل های منحنی خشک کردن لایه ای نازک فلفل دلمه‌ای بر اساس مدل های توصیه شده توسط محققانی که در این زمینه کار نموده اند طبق جدول (۱)

of-02 G با نام تجاری jeio Tech ساخت کره‌ی جنوبی منتقل و دمای خشک کن روی دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد در سه آزمایش جدا گانه تنظیم شد. نمونه های خشک کن به صورت متناوب به فاصله‌ی زمانی ۵ دقیقه در بیست دقیقه اول و هر ۱۰ دقیقه و سپس هر ۱۵ و ۳۰ دقیقه تا رسیدن به وزن ثابت از خشک کن خارج و توزین شدند. اوزان اندازه گیری شده در فرم مربوطه ثبت گردید. عملیات تا زمان رسیدن به وزن ثابت ادامه داشت (۴).

۲-۲- تعیین مقدار رطوبت

رطوبت اولیه‌ی فلفل دلمه‌ای از طریق خشک کردن حدود ۵ گرم نمونه در آون با دمای 2 ± 103 درجه‌ی سانتیگراد تا رسیدن به وزن ثابت، اندازه گیری شد (۵). این کار در پنج تکرار انجام و میانگین اعداد گزارش شد. رطوبت اولیه‌ی فلفل دلمه‌ای 0.2 ± 92 به دست آمد. در زمان‌های مختلف درصد رطوبت در مبنای مرطوب، محاسبه گردید (۳).

در ادامه رطوبت در مبنای مرطوب از فرمول (۱) به رطوبت در

مبنای خشک، تبدیل شد (۲۵).

$$MC_{db} = \frac{MC_{wb}}{(1 - MC_{wb})} \quad (1)$$

MC_{db} = رطوبت در مبنای خشک

MC_{wb} = رطوبت در مبنای مرطوب

سپس سرعت خشک کردن از معادله‌ی (۲) محاسبه گردید:

$$Rate = \frac{Kg H_2O}{Kg DM min} = \frac{\Delta MC_{db}}{\Delta t} \quad (2)$$

با بررسی اطلاعات ثبت شده و تبدیل رطوبت در مبنای مرطوب به رطوبت در مبنای خشک و به دست آوردن سرعت خشک کردن، منحنی های زمان و سرعت خشک کردن سه تیمار (۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد) توسط برنامه‌ی Excel ترسیم شد.

۲-۳- چروکیدگی

جهت تعیین چروکیدگی، حجم اولیه‌ی نمونه ها قبل از خشک کردن به روش اندازه گیری حجم توسط تولون محاسبه و ثبت گردید. بعد از خشک شدن نمونه ها، مجدداً از این روش برای اندازه گیری حجم نمونه‌ی خشک شده استفاده گردید. این اندازه

انتخاب گردید. منحنی‌های خشک کردن توسط ۱۱ مدل رطوبت مختلف که به طور وسیعی برای مواد بیولوژیکی و اکثر مواد غذایی به کار برده می‌شود مورد برازش قرار گرفت. این مدل‌ها از طریق ساده کردن قانون دوم فیک، مشتق شده است (۱۴، ۳۰، ۳۳).

۲-۶ آنالیز داده‌های خشک کردن

مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک کردن جهت به دست آوردن مقادیر ضرایب ثابت این مدل‌های توصیفی (K و n, c, b, a) با استفاده از داده‌های مربوط به سینتیک خشک کردن لایه‌ای نازک برش‌های فلفل دلمه‌ای به کمک ابزار برازش منحنی در نرم افزار Sigma Plot Ver ۱۰ برآورد گردید. در این تحقیق، برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف کننده سینتیک خشک کردن لایه‌ای نازک برش‌های فلفل دلمه‌ای، ضریب همبستگی، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا، کای اسکور و خطای میانگین ما بین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفت. این معیارها توسط معادلات زیر محاسبه شدند.

(۷)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - Z} \quad (9)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})$$

در این معادلات $MR_{exp,i}$ رطوبت برش‌های فلفل دلمه‌ای مشاهده شده در هر بار اندازه‌گیری، $MR_{pre,i}$ رطوبت برش‌های فلفل دلمه‌ای پیش‌بینی شده از مدل در هر بار اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و Z تعداد ضرایب ثابت به کار رفته در هر مدل می‌باشد. برای سنجش بهترین مدل جهت پیش‌بینی نحوه‌ی خشک شدن برش‌های فلفل دلمه‌ای ۴ معیار $RMSE$ ، R^2 ، X^2 و MBE مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، مدل خشک کردن با حداکثر همبستگی R^2 و حداقل

۲-۷ تعیین ضریب انتشار رطوبت و انرژی اکتیواسیون

امروزه در صنایع غذایی انتقال رطوبت در مواد غذایی موضوع بسیار مهمی است. شمار مکانیسم‌های انتقال رطوبت، گسترده و اغلب پیچیده است. پدیده‌ی انتقال معمولاً بر حسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی طبقه بندی می‌شود. (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال، نفوذ معمولی نام دارد). قانون فیک^۱ اغلب برای توصیف پدیده‌ی نفوذ رطوبت به کار می‌رود (۸، ۱۳، ۳۰).

(۱۰)

$$\frac{\delta X}{\delta t} = D_{eff} \frac{\delta^2 X}{\delta x^2}$$

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و x مختصه‌ی فضایی^۲ می‌باشد. معادله‌ی انتشاری قانون دوم فیک بر انتشار جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد (۱۸، ۳۰). برای به کار بردن قانون فیک فرض می‌گردد که فرآورده غذایی تک بعدی است، رطوبت اولیه‌ی یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت به مثابه‌ی مقاومت اصلی در برابر انتقال رطوبت است. متأسفانه در نظریه‌ی انتشار، چروکیدگی، سخت شدن سطحی یا ایزوترم‌های جذب در نظر گرفته نمی‌شود (۸).

حل معادله‌ی فیک برای یک تیغه^۳ به صورت زیر می‌باشد و ضریب نفوذ موثر از طریق محاسبه‌ی شیب معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

(۱۱)

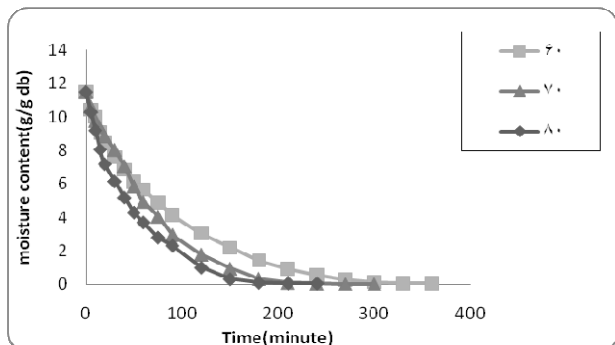
$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right]$$

وقتی که نمودار مقدار $\ln MR$ نسبت به زمان رسم گردد شیب خط به دست آمده را در معادله‌ی زیر قرار داده تا ضریب نفوذ موثر به دست آید.

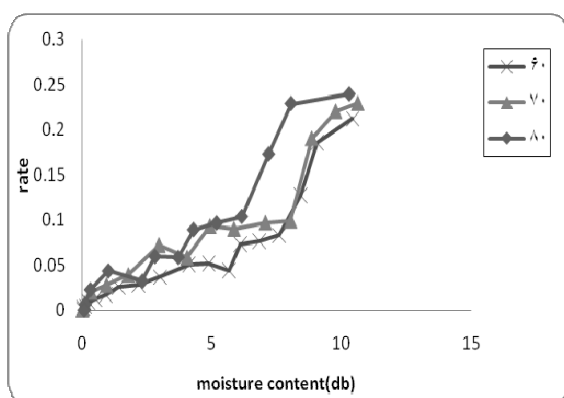
$$k_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$$

- 1- Fick,s Low
- 2- Spatial Coordinate
- 3- Slab

۸۰ درجه‌ی سانتیگراد می باشد. نتایج مشابهی توسط دویماز بر روی هویج و بامیه و گوجه فرنگی گزارش شده است (۱۱، ۱۲، ۱۳).



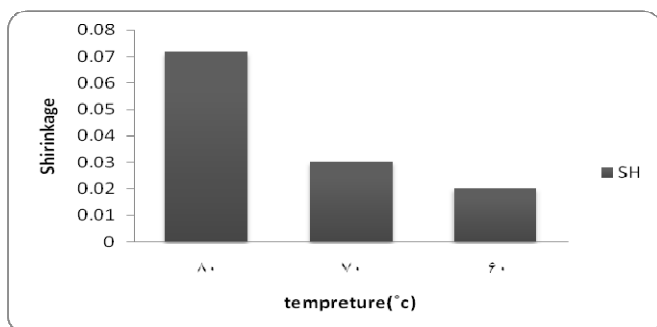
شکل ۱- منحنی خشک کردن بر حسب رطوبت در مبنای خشک



شکل ۲- سرعت خشک کردن فلفل دلمه‌ای در دماهای مورد آزمون

۳-۳- تاثیر دمای هوا بر چروکیدگی

نتایج به دست آمده در شکل (۳) نشان می دهد با افزایش دمای خشک کردن میزان چروکیدگی افزایش می یابد. کم ترین چروکیدگی در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتیگراد مشاهده می شود. اوگی و همکاران (۲۰۰۵) نتایج مشابهی را بر روی زیتون گزارش کرده اند (۱۴).



شکل ۳- اثر دما بر چروکیدگی فلفل دلمه‌ای خشک شده در دماهای مورد آزمون

که در معادلات فوق m_t میزان رطوبت در زمان t ، m_0 مقدار رطوبت تعادلی، L نیم ضخامت تیغه (بر حسب متر)، D_{eff} ضریب نفوذ موثر (بر حسب متر مربع بر ثانیه)، t زمان (بر حسب ثانیه)، MR نسبت رطوبت (بدون بعد) و K شیب خط می باشد. ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده های تجربی خشک کردن بر حسب $Ln MR$ نسبت به زمان تعیین می گردد. ضریب نفوذ موثر همان شیب زاویه‌ی بخش خطی است. وابستگی قابلیت نفوذ موثر در رطوبت با دما بر حسب معادله‌ی آرنیوس بیان می شود (۳، ۲۳، ۳۰).

(۱۳)

$$D_{eff}^0 = D^0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

(۱۴)

$$\ln D_{eff}^0 = \ln D^0 + \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right)$$

که در آن D^0 ضریب پیش نمایی معادله‌ی آرنیوس E_a انرژی فعال سازی برای نفوذ رطوبت (m^2/s)، R ، ثابت جهانی گازهای ایده ال ($Kj/Kmol$)، T ، دمای مطلق بر حسب کلونین می باشد. انرژی فعال سازی را می توان با ترسیم $\ln D_{eff}$ بر حسب $1/T$ تعیین نمود.

۳- نتایج و بحث

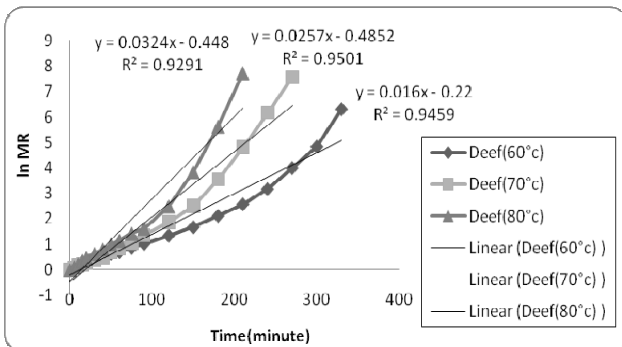
۳-۱- تاثیر دمای هوا روی زمان خشک کردن

نتایج، نشان داد که با افزایش دما زمان خشک کردن کاهش می یابد و کم ترین زمان خشک کردن مربوط به دمای $80^\circ C$ می باشد. منحنی خشک کردن بر حسب رطوبت در مبنای خشک در شکل (۱) داده شده است. نتایج مشابهی برای تاثیر دما روی زمان خشک کردن توسط دویماز و همکاران گزارش گردید (۴۰).

۳-۲- تاثیر دمای هوا روی سرعت خشک کردن

منحنی های سرعت خشک کردن فلفل دلمه‌ای در دامنه دمای ۶۰، ۷۰ و $80^\circ C$ درجه‌ی سانتیگراد در شکل (۲) نشان می دهد که افزایش دما از $60^\circ C$ به $80^\circ C$ سبب افزایش سرعت خشک کردن می گردد. بنابراین، بیش ترین سرعت خشک کردن مربوط به دمای

نفوذ افزایش می‌یابد و کم‌ترین ضریب نفوذ مربوط به دمای ۶۰ ° می‌باشد. آگون (۲۰۰۵) و کوچکی (۲۰۰۷) به نتایج مشابهی دست یافتند (۸، ۱۸).



شکل ۵- نمودار ضریب نفوذ نسبت به زمان در دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد

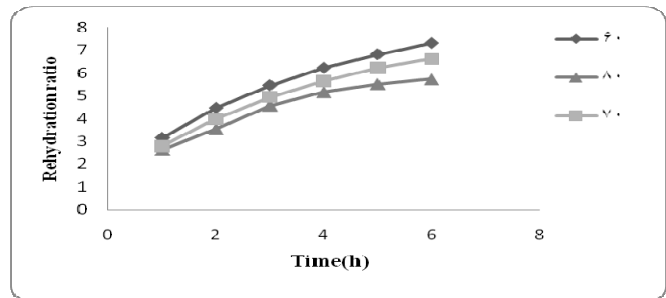
مقادیر D_{eff} برای فلفل دلمه‌ای در دامنه‌ی دمایی ۶۰ تا ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد در دامنه‌ی (m^2/s) 10^{-9} تا 10^{-9} قرار دارد. نتایج، نشان داد که با افزایش دمای خشک کردن مقدار انتشار رطوبت موثر افزایش می‌یابد که این مطلب از طریق حرکت یا انتقال جرم از منافذ موئینه‌ی ماده‌ی غذایی توصیف می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد بالاترین مقدار انتشار رطوبت موثر مشاهده می‌گردد. مقادیر D_{eff} به‌طور مشابه توسط سایر نویسندگان برای کیوی و سایر سبزیجات گزارش گردید. به طوری که انتشار رطوبت برای کیوی با خشک کن جابه‌جایی هوا با سرعت ۱/۱ متر بر ثانیه در دامنه‌ی دمایی ۴۰ تا ۷۰ درجه‌ی سانتیگراد m^2/s $3/79-7/53 \times 10^{-12}$ بود، انتشار رطوبت برای گوجه‌فرنگی در دامنه‌ی دمایی ۴۵-۷۵ درجه‌ی سانتیگراد m^2/s $3/72-12/27 \times 10^{-9}$ برای سیب زمینی خشک در دامنه‌ی دمایی ۵۰ تا ۷۰ درجه‌ی سانتیگراد m^2/s $0/87-2/17 \times 10^{-9}$ می‌باشد (۷، ۹، ۱۱، ۲۰، ۳۰، ۳۷، ۳۸).

۷- انرژی اکتیواسیون

انرژی اکتیواسیون از طریق رسم منحنی $\ln Deff$ در مقابل دما $(1/(T+273))$ به دست می‌آید (شکل ۷). معادله‌ی زیر تاثیر دما را روی $Deff$ برای فلفل دلمه‌ای خشک شده نشان می‌دهد. در ضخامت 0.2 ± 0.6 میلی‌متر داریم:

۳-۴- تاثیر دمای هوا بر بازآپوشی مجدد

بر اساس شکل (۴) نتایج، نشان می‌دهد با افزایش دما میزان بازآپوشی مجدد کاهش یافت به طوری که کم‌ترین میزان بازآپوشی در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد مشاهده شد. این نتیجه، بیانگر تخریب کمتر لوله‌های موئین در دمای پایین می‌باشد. سیمون (۱۹۹۷) بر روی فلفل دلمه و واراد هاراجو (۲۰۰۱) بر روی گیلاس نتایج مشابهی را گزارش نموده‌اند (۲۹، ۳۸).



شکل ۶- نسبت بازآپوشی مجدد در فلفل دلمه‌ای خشک شده

۳-۵- مدل‌سازی سینتیک خشک کردن

۱۱ مدل دینامیکی خشک کردن روی فلفل دلمه‌ای در دامنه‌ی دمایی ۶۰ تا ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد مورد برآزش قرار گرفت. پارامترهای آماری مورد آزمون شامل R^2 ، X^2 ، MBE ، $RMSE$ بود. مقادیر محاسبه شده این پارامترها در دماهای مورد آزمون در جدول (۲) به‌طور مختصر نمایش داده شده است. در همه‌ی حالت‌ها مقدار R^2 برای مدل‌های مورد برآزش از ۰/۹۲۴۹ بیش‌تر بود. بازه‌ی تغییرات R^2 در دامنه‌ی دمایی ۶۰ تا ۸۰ از ۰/۹۲۴۹ تا X^2 ، ۰/۹۹۷۸ از 10^{-6} تا $26/82 \times 10^{-4}$ و مقدار دامنه‌ی تغییر $RMSE$ نیز از ۰/۱۵۵۳ تا ۰/۲۶۷۹ قرار داشت. نتایج آنالیز آماری نشان داد که مدل تقریبی انتشار^۱ دارای بالاترین R^2 و کم‌ترین X^2 و $RMSE$ برای نمونه‌های خشک شده در دمای ۶۰ و ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد می‌باشد و مدل ورما دارای بالاتری R^2 و کم‌ترین X^2 و $RMSE$ برای نمونه‌ی خشک شده در دمای ۷۰ می‌باشد.

۳-۶- ضریب نفوذ موثر و انتشار رطوبت موثر

ضریب نفوذ موثر از قرار دادن شیب نمودارهای شکل (۵) در معادله‌ی (۱۳) محاسبه شد. نتایج، نشان داد با افزایش دما ضریب

جدول ۱- مدل‌های ریاضی خشک کردن لایه‌ی نازک

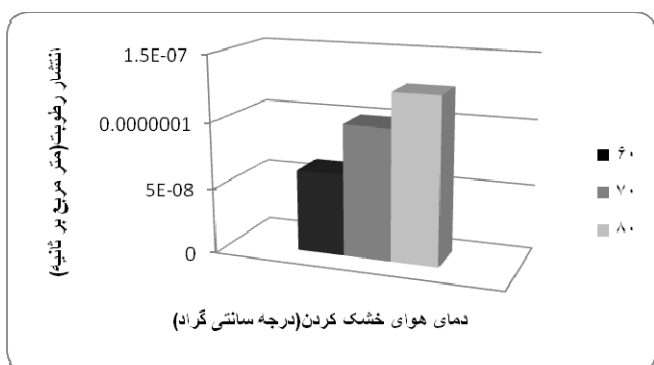
Model number and name	Model	Reference
1.Newton	$MR=\exp(-Kt)$	Ozcan et al. (2005)
2.Henderson and pabis	$MR=a \exp(-Kt)$	Ghodake et al. (2006)
3.Modified Henderson and pabis	$MR=a \exp(-Kt)+b \exp(-gt)+c \exp(-ht)$	Karathanos (1999)
4.Page	$MR=\exp(-Ktn)$	Sobukola and Dairo (2007)
5.Logarithmic	$MR=a \exp(-Kt)+c$	Xanthopoulos et al. (2007)
6.Tow-term	$MR=a \exp(-K_0t)+b \exp(-K_1t)$	Sacilik et al. (2006)
7.Tow-term exponential	$MR=a \exp(-Kt)+(1-a)\exp(-Kat)$	Sharaf-Eldeen et al. (1980)
8.Approximation of diffusion	$MR=a \exp(-Kt)+(1-a)\exp(-Kht)$	Yaldiz and Ertekin (2001)
9.Verma et al	$MR=a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$	Verma et al. (1985)
10.Wang and Sing	$MR=1+at+bt^2$	Demir et al. (2007)
11.Parabolic	$MR=at+bt+ct^2$	Sharma and Prasad (2004)

(۱۵)

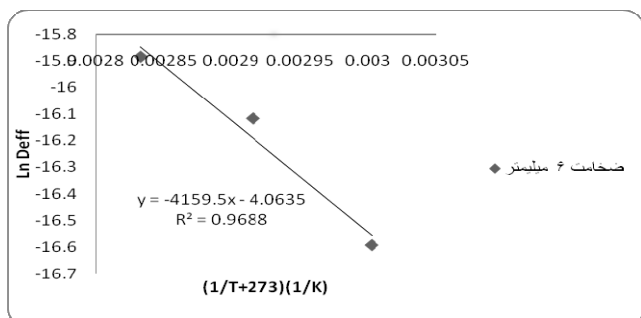
$$D_{eff} = 58.177 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{4159}{(T+273)}\right)$$

$$(R^2 = 0.9688)$$

مقدار انرژی اکتیواسیون در دامنه دمایی ۶۰ تا ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در ضخامت 6 ± 0.2 میلی‌متر برای فلفل دلمه‌ای $34/577$ KJ/mol محاسبه شد. مقدار انرژی اکتیواسیون توسط سایر محققین برای محصولات مختلفی محاسبه شده است به طوری که این مقدار برای کیوی با خشک کن جابه جایی هوا با سرعت $1/1$ متر بر ثانیه در دامنه‌ی دمایی ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد $38/6$ KJ/mol، چیلی قرمز ($41/95$ KJ/mol)، نخود سبز خشک شده ($28/40$ KJ/mol)، بامیه خشک شده ($51/26$ KJ/mol)، گوجه فرنگی خشک شده با پیش تیمار اتیل اولئات قلیایی ۲٪ و نمونه‌ی کنترل شده به ترتیب ($32/94$ و $17/40$ KJ/mol)، گیلاس خشک شده با پیش تیمار اتیل اولئات ۲٪ و نمونه‌ی کنترل شده به ترتیب ($9/17$ و $3/05$ KJ/mol) و انجیر خشک شده ($40/95$ KJ/mol) گزارش شده است (۹، ۱۱، ۱۲، ۱۵، ۳۰، ۳۳، ۴۲).



شکل ۶- مقایسه‌ی انتشار رطوبت در فلفل دلمه‌ای در دماهای مختلف مورد آزمون



شکل ۷- رابطه‌ی بین انتشار رطوبت و دمای مطلق به دست آمده از رابطه‌ی آرنیوس

جدول ۲- نتایج آماری مدل های خشک کردن فلفل دلمه‌ای در دماهای مورد آزمون

<i>tem</i>	<i>Model Name</i>	<i>Canstants</i>	R^2	X^2	<i>RMSE</i>	<i>MBE</i>
60	1.Newton	K=0.0123	0.9947	0.000617	0.024211	0.00715
	2.Henderson and pabis	a=0.9636,K=0.0117	0.9968	0.000395	0.018870	0.00295
	3.Modified Henderson and pabis	a, c ,b=0.3212, K ,h ,g=0.0117	0.9968	0.000508	0.018870	0.00295
	4.Page	k=0.0173, n=0.9214	0.9966	0.000424	0.019544	0.00645
	5.Logarithmic	a=0.9777, K=0.011, C=-0.0206	0.9973	0.000349	0.017248	0.00001
	6.Tow-term	a , b=0.4818, K0 , K1=0.0117	0.9968	0.000445	0.018875	0.00295
	7.Tow-term exponential	a=0.0658, K=0.1699	0.9978	0.000268	0.015536	0.00418
	8.Approximation of diffusion	a=0.0657, k=0.1644 , b=0.0679	0.9978	0.000284	0.015543	0.00472
	9.Verma et al	a=-10031296.2, K, g=0.0334	0.9249	0.009819	0.091359	-0.03040
	10.Wang and Sing	a=-0.007996, b=0.00001530	0.9487	0.006334	0.075503	0.03138
	11.Parabolic	a=0.8861, b=-0.00651, C=0.000011	0.9809	0.002500	0.046101	0.000003
70	1.Newton	K=0.0143	0.9938	0.000816	0.027757	0.00531
	2.Henderson and pabis	a=0.0146 , K=1.0173	0.9942	0.000797	0.026796	0.0077
	3.Modified Henderson and pabis	a, b, c=0.3391,K , g, h=0.0146	0.9942	0.001077	0.267961	0.0077
	4.Page	k=0.008160, n=1.1342	0.9972	0.000393	0.018699	0.00678
	5.Logarithmic	a=1.0533,K=0.013 C=-0.0484	0.9971	0.000438	0.019102	0.000002
	6.Tow-term	a, b=0.5086, K0, K1=0.0146	0.9942	0.000923	0.026796	0.0077
	7.Tow-term exponential	a=0.002171, K=6.5657	0.9937	0.000883	0.028016	0.0051
	8.Approximation of diffusion	a=-0.0291, k=-0.0017093 , b=-7.6835	0.9967	0.000488	0.020186	0.00093
	9.Verma et al	a=-37439.02, K, g=0.0208	0.9973	0.000397	0.018193	0.00713
	10.Wang and Sing	a=-00977 , b=0.000022465	0.9814	0.002609	0.048162	0.01647
	11.Parabolic	a=0.9395, b=-0.0088, C=0.000019	0.9894	0.001587	0.036372	0.000003
80	1.Newton	K=0.0205	0.9956	0.000499	0.021640	0.005032
	2.Henderson and pabis	a=0.977 , K=0.0198	0.9964	0.000440	0.019638	0.002597
	3.Modified Henderson and pabis	a ,b ,c=0.3257, K ,g ,h=0.0198	0.9964	0.000617	0.019638	0.002597
	4.Page	k=0.0261, n=0.9371	0.9968	0.000396	0.018629	0.004670
	5.Logarithmic	a=0.9878, K=0.019, C=-0.0156	0.9968	0.000425	0.018601	0.000009
	6.Tow-term	a , b=0.4885, K0 , K1=0.0198	0.9964	0.000514	0.019638	0.002597
	7.Tow-term exponential	a=0.0486, K=0.3927	0.9970	0.000364	0.017849	0.000318
	8.Approximation of diffusion	a=0.0647, k=0.1485 , b=0.1261	0.9973	0.000351	0.016896	0.004520
	9.Verma et al	a=5181976, K, g=0.0249	0.9951	0.000653	0.023043	0.003545
	10.Wang and Sing	a=-0.0129 , b=0.000038376	0.9373	0.007690	0.082033	0.03142
	11.Parabolic	a=0.8815, b=-0.0106, C=0.000029	0.9720	0.003699	0.05482	0.000001

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر دما بر روی ویژگی‌های خشک کردن فلفل دلمه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. افزایش دمای خشک کردن سبب کاهش زمان و بالا رفتن آهنگ خشک کردن و انتشار موثر گردید به گونه‌ای که فلفل دلمه‌ای خشک شده در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد دارای کم‌ترین زمان خشک کردن بود. افزایش دمای خشک کردن باعث افزایش میزان چروکیدگی گردید و بر بازآپوشی اثر معکوس داشت و بازآپوشی را کاهش داد. به طوری که بیش‌ترین چروکیدگی در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد مشاهده شد که به دلیل تخریب بیش‌تر لوله‌های موئین در اثر دمای بالا کم‌ترین بازآپوشی را به خود اختصاص داده بود. همچنین، نتایج مدل‌سازی نشان داد که در بین مدل‌های ریاضی مورد برازش، مدل تقریبی انتشار برای خشک کردن فلفل دلمه‌ای در دمای ۶۰ و ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد و مدل ورم و همکاران برای خشک کردن در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتیگراد به دلیل داشتن حداکثر R^2 و حداقل X^2 و RMSE به عنوان بهترین مدل برای خشک کردن فلفل دلمه‌ای انتخاب شدند. انتشار رطوبت موثر در دامنه‌ی دمایی ۶۰ تا ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد برای فلفل دلمه‌ای در دامنه (m^2/s) 10^{-8} تا 6×10^{-7} تا $1/2 \times 10^{-7}$ ارزیابی گردید. انرژی اکتیواسیون در دامنه‌ی دمایی ۶۰ تا ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد در ضخامت 0.2 ± 0.6 میلی متر فلفل دلمه‌ای Kj/mol $34/577$ تعیین گردید.

۵- منابع

- ۱- پیوست ، غ . ۱۳۸۱. سبزیکاری ، انتشارات علوم کشاورزی ، چاپ دوم .
- ۲- جورج دیلو، وور و مک کام ، ج. پ .، ترجمه مبلی، م. و پیراسته، ب . ۱۳۷۷. تولید سبزی ، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان . اصفهان، چاپ دوم.
- ۳- رضوی، م.ع. و اکبری، ر. ۱۳۸۵. خواص بیوفیزیک محصولات کشاورزی و مواد غذایی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- ۴- شریفی، ا. و توکلی پور، ح. ۱۳۸۷. بهینه سازی فرایند خشک کردن ریواس جهت تهیه پودر ریواس، مجموعه مقالات مجدهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی، مشهد مقدس.
- 5- Ade-Omowaye, B.I.O. Rastogi, N.K. Angersbach, A. and Knorr, D .2002. Osmotic dehydration of bell peppers: influence of high intensity electric field pulses and elevated temperature treatment, *Journal of Food Engineering* 54: 35–43.
- 6- Ajibola, O.O.1989. Thin layer drying of melon seed ,*Journal of Food Engineering* 9(4), 305–320.
- 7- Ahrne´, L . Prothon, F. & Funebo, T. 2003. Comparison of drying kinetics and texture effects of two calcium pretreatments before microwave-assisted dehydration of apple and potato , *International Journal of Food Science and Technology* 38, 411–420.
- 8- Akgun,N.A. Doymaz,I . 2005.Modeling of olive cake thin-layer drying process , *Journal of Food Engineering* 68,455–461.
- 9- Brennan, J. G. Butters, J. R. Cowell, N. D. & Lilly, A. E. V. 1981.*Food engineering operations* (2nd ed.).London: Applied Sciences Publishers.
- 10- Demir,V. Gunhan, T. and Yagcioglu, A.K . 2007. Mathematical modeling of convection drying of green table olives. *Biosyst. Eng* 98, 47–53.
- 11- Doymaz,I. 2004.Convective air drying characteristics of thin layer carrots, *Journal of Food Engineering* 61.359–364.
- 12- Doymaz,I. 2005.Drying characteristics and kinetics of okra, *Journal of Food Engineering* 69.275–279.
- 13- Doymaz,I. 2007.Air-drying characteristics of tomatoes, *Journal of Food Engineering* 78,1291–1297.
- 14-Gaye Öngen, Sayit Sargi-n, Derya Tetik and Timur Köse.2005. Hot Air Drying of Green Table Olives, *Food Technol Biotechnol* 43 (2) 181–187.
- 15- Ghodake, H.M. Goswami, T.K. and Chakraverty, A.2006.Mathematical modeling of withering characteristics of tea leaves. *Dry Technol* 24, 159–164.
- 16- Gupta, P. Ahmed, J. Shivhare, U. S. & Raghavan, G. S. V. 2002.Drying characteristics of red chilli, *Drying Technology* 20, 1975–1987.
- 17-Karathanos,V.T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics, *J. Food Eng* 39, 337–344.
- 18-koocheki,A.Razavi,S.M.A.Milani,E. Moghadam, T.M. Abedini, M. Alamatian,S. and et al.2007.Physical properties of watermelon seed as a function of moisture content and variety, *International Agrophysics* 21:349-359
- 19- Krokida,M.K. Karathanos,V.T. Maroulis,Z.B. Marinou-Kouris,D. 2003.Drying kinetics of some vegetables, *Journal of Food Engineering* 59,391-403.
- 20- Madamba, P. S. Driscoll, R. H. & Buckle, K. A. 1996. The thin-layer drying characteristics of garlic slices, *Journal of Food Engineering* 29, 75–97.
- 21-Mezzetti, A. Lapenna, D. Pierdomenico, S.D. Calafiore, A.M. and et al. 1995.Vitamin E, C and