

مطالعه اثر روش‌ها و پیش‌تیمارهای گوناگون خشک‌کردن بر سینتیک بازآب‌پوشی فلفل قرمز چیلی (*capsicum annum*)

حمید توکلی‌پور^{۱*}، محسن مختاریان^۲

۱. گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران
 ۲. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۴/۲۳)

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی تأثیر روش خشک‌کردن به دو صورت خشک‌کردن با هوای داغ و آفتابی و پیش‌تیمار (آنزیم‌بری با آب داغ و تیمار شیمیایی) روی سینتیک انتقال جرم طی پدیده بازآب‌پوشی فلفل قرمز چیلی بود. برای این منظور قانون دوم فیک و مدل پلگ برای مدل‌سازی پدیده بازآب‌پوشی فلفل قرمز چیلی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل پلگ توانست با دقت بالایی پدیده بازآب‌پوشی فلفل قرمز چیلی را پیشگویی کند ($R^2 \geq 0.9320$). مقادیر ضرایب انتشار رطوبت در زمینه فلفل قرمز چیلی در دامنه $1/217 \times 10^{-8}$ تا $5/540 \times 10^{-8}$ m^2/s قرار دارد. همچنین نتایج نشان داد که پیش‌تیمار آنزیم‌بری با آب جوش در مقایسه با سایر پیش‌تیمارها میزان بازآب‌پوشی را کمی افزایش داده است که بیشترین مقدار این پارامتر در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد.

کلیدواژگان: پیش‌تیمارهای شیمیایی، خشک‌کردن، سینتیک بازآب‌پوشی، مدل‌سازی.

مقدمه

فلفل قرمز چیلی^۱ یکی از ارقام فلفل است که به‌طور وسیعی در جهان کشت و کار می‌شود. این محصول به‌صورت تازه و پخته‌شده مصرف می‌شود و به‌طور معمول بیشتر به‌صورت ادویه‌ای و طعم‌دهنده در مواد غذایی و نیز در فرمولاسیون انواع سس‌ها، چاشنی‌ها، و فراورده‌های کنسروی استفاده می‌شود (Isiduro *et al.*, 1995). فلفل قرمز چیلی از منابع خوب ویتامین‌های آ و ث و غنی از بتاکاروتن و مواد معدنی چون پتاسیم است (Akintunde, 2010).

فلفل قرمز چیلی معمولاً پس از برداشت خشک می‌شود. خشک‌کردن فلفل قرمز در ایران به‌ویژه در استان خراسان بیشتر به روش سنتی توسط خشک‌کردن در هوای آزاد و در معرض نور خورشید انجام می‌شود. این عمل معمولاً در مدت زمان طولانی حدود ده روز به طول می‌انجامد. بنابراین با توجه به ضعف‌ها و معایب روش خشک‌کردن آفتابی از نظر بهداشتی همچون آلودگی ثانویه و وقت‌گیر بودن، روش‌های دیگر مانند خشک‌کردن خورشیدی و یا جابه‌جایی هوای داغ پیشنهاد می‌شود (Akintunde, 2010).

به‌کارگیری پیش‌تیمارهای گوناگون، به‌منظور کاهش زمان خشک‌کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای خشک‌بار، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت خشک‌کردن مواد غذایی دارد. آنزیم‌بری، آبگیری اسمزی، و به‌کارگیری ترکیبات شیمیایی (پتاسیم‌متابی‌سولفات^۲، هیدروکسیدپتاسیم و سدیم^۳، کربنات پتاسیم^۴، امولسیون‌های استر اتیل و متیل^۵، اسیدسیتریک^۶، و اسیدآسکوربیک^۷) از پیش‌تیمارهایی است که در صنعت خشک‌بار استفاده می‌شود (Doymaz, 2010). هدف از استفاده از محلول‌های پیش‌فرایند، افزایش روند خشک‌کردن و تولید فراورده‌ای با کیفیت مطلوب است. یکی از روش‌های سنجش کیفیت فراورده نهایی آزمون بازآب‌پوشی است. بازآب‌پوشی فرایند پیچیده‌ای است که به بازگرداندن ویژگی‌های ماده غذایی می‌انجامد. بنابراین یک ماده غذایی بازآب‌پوشی‌شده، خصوصیات مشابه با محصول تازه را نشان می‌دهد. بازآب‌پوشی می‌تواند به‌عنوان معیار سنجش تخریب ماده غذایی در حین فرایند خشک‌کردن در نظر گرفته شود. بازآب‌پوشی بافت‌های گیاهی خشک متشکل از سه فرایند همزمان شامل: جذب آب به

2. Potassium meta bisulphate
3. Potassium and sodium hydroxide
4. Potassium carbonate
5. Methyl and ethyl ester
6. Citric acid
7. Ascorbic acid

* نویسنده مسئول: h.tavakolipour@gmail.com

1. Chilli red pepper

آب و کاهش انتشار مواد جامد می‌شود. (Dadali et al., 2008) تأثیر شرایط خشک کردن را روی سینتیک بازآب‌پوشی اسفناج خشک شده با میکروویو بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل پلگ بهتر توانست شرایط آبیگری مجدد اسفناج را برازش کند. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر روش‌های پیش تیمار، دما، و زمان خشک کردن بر سینتیک بازآب‌پوشی فلفل قرمز چیلی است.

مواد و روش‌ها

مواد

به منظور انجام این پژوهش فلفل واریته capsicum annum به عنوان ماده اولیه از فروشگاه محلی در شهر نیشابور خریداری شد. میزان رطوبت اولیه فلفل‌های تازه خریداری شده ۶/۲۹ (مبنای خشک) اندازه‌گیری شد. همچنین مواد شیمیایی استفاده شده مشتمل بر اتیل اولئات (دارای خلوص ۹۸ درصد) و کرینات پتاسیم (دارای خلوص ۹۹ درصد) ساخت شرکت مرک آلمان بودند.

روش‌ها

آماده‌سازی مواد اولیه

پس از خریداری، فلفل به منظور کاهش فعالیت‌های تنفسی و بیولوژیکی تا زمان آزمایش در یخچال در دما ۴/۶-۷/۲ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۸۰ تا ۹۰ درصد به مدت ۷ روز نگهداری شد. پس از خروج از یخچال نمونه‌ها تمیز و مواد خارجی جدا شدند. در هر آزمون ۳۰ گرم فلفل استفاده شد (تعداد تکه‌ها در هر آزمون تقریباً ۶۰ عدد بود) که فلفل‌ها در جهت طولی به تکه‌های ۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر برش داده شدند.

پیش‌فرایندها

پیش‌فرایندهای استفاده شده برای خشک کردن فلفل قرمز چیلی به این صورت انتخاب شد:

آنزیم‌بری با آب داغ^۴ (WB): نمونه‌های فلفل در آب داغ با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ دقیقه آنزیم‌بری شدند و سپس روی یک توری فلزی قرار گرفتند تا آب اضافی آنها خارج شود.

تیمار شیمیایی^۵ (CT): نمونه‌های فلفل به طور جداگانه در محلول ۲ درصد اتیل اولئات و ۵ درصد کرینات پتاسیم به مدت ۱ دقیقه در دمای اتاق فروری شد.

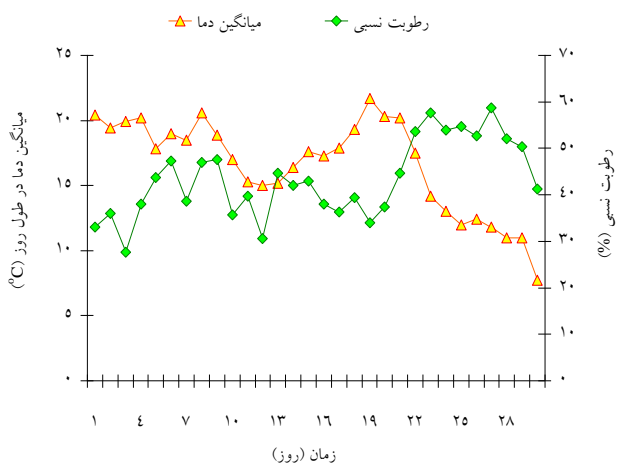
داخل ماده خشک، متورم شدن محصول بازآب‌پوشی شده، و تراوش مواد محلول جامد به محیط بازآب‌پوشی است (Vega-Gálvez et al., 2009). معادلات تجربی بسیاری برای مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم طی فرایند بازآب‌پوشی ارائه شده‌اند که برای بهینه‌سازی فرایند بازآب‌پوشی مفید است. اکثر مدل‌های استفاده شده برای توصیف بازآب‌پوشی، بر اساس مدل انتشاری قانون دوم فیک برای اشکال هندسی گوناگون هستند. در میان معادلات تجربی، مدل پیشنهادی (Peleg (1988) به نسبت سایر مدل‌ها اهمیت بیشتری دارد.

بازآب‌پوشی تحت تأثیر فاکتورهای متفاوتی شامل فاکتورهای ذاتی^۱ و درونی (ترکیب شیمیایی فراورده، پیش تیمار خشک کردن، فرمولاسیون محصول، شرایط و روش خشک کردن، روش پس از خشک کردن^۲، و مانند اینها) و غیرذاتی^۳ چون ترکیب محیط غوطه‌وری (آب، شیر، آب‌میوه، و مانند اینها)، دما، و شرایط هیدرودینامیک قرار می‌گیرد (Taiwo et al., 2004; Debnath et al., 2002). محققان پژوهش‌های گوناگونی در زمینه آبیگری مجدد محصولات متفاوت انجام داده‌اند که در ادامه به بررسی چند مورد پرداخته می‌شود. (Jiao et al., 2014) مدل‌سازی آبیگری بازآب‌پوشی برنج فوری را در روش ترکیبی خشک کردن با میکروویو-هوای داغ مطالعه کردند. نتایج نشان داد که استفاده ترکیبی از میکروویو و هوای داغ به نسبت استفاده از آنها به صورت مجزا، سبب کاهش زمان خشک کردن شد. همچنین استفاده از توان ۳۰۰ وات در ترکیب با دمای هوای خشک کردن ۸۰ درجه سانتی‌گراد، سبب بهینه شدن زمان خشک کردن شد. (Cunningham et al., 2008) سینتیک بازآب‌پوشی قطعات استوانه‌ای سیب‌زمینی را مطالعه کردند. برای این منظور نمونه‌های سیب‌زمینی در آون جابه‌جایی هوای داغ (دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد) و یا در آون میکروویو (توان‌های ۲۵۰، ۴۴۰، و ۶۰۰ وات) خشک و سپس در حمام آب در دمای بین ۲۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد بازآب‌پوشی شد. نتایج نشان داد که سینتیک بازآب‌پوشی نمونه به دما، نسبت مواد جامد به مایع، ابعاد نمونه، پیش‌آنزیم‌بری، روش خشک کردن، و پیش‌خیساندن (سورفاکتانت یونی و نمک طعام) وابسته است. همچنین هم‌زدن و سورفاکتانت غیریونی تأثیری بر فرایند بازآب‌پوشی نمونه‌ها نداشت. (Rastogi et al., 2004) تأثیر پیش تیمارهای اسمزی را روی ویژگی‌های بازآب‌پوشی هویج مطالعه کردند. نتایج نشان داد که تیمار بالاتر از ۱۰ درجه بریکس منجر به افزایش انتشار

4. Water blanching (WB)
5. Chemical treatment (CT)

1. Intrinsic factors
2. Post-drying procedures
3. Extrinsic factors

نیشابور نشان می‌دهد. همچنین میانگین حداکثر سرعت باد طی این ماه طبق داده‌های ایستگاه هواشناسی منطقه، ۷ متربرثانیه ثبت شد. در هر یک از آزمایش‌ها خشک‌کردن در سه تکرار انجام شد.



شکل ۱. میانگین دما و رطوبت نسبی در طول روزهای مهر در شهر نیشابور طی فرایند خشک‌کردن فلفل قرمز در آفتاب

سینتیک بازآب‌پوشی

تعیین بازآب‌پوشی

برای تعیین نسبت بازآب‌پوشی، ۱ گرم نمونه فلفل خشک‌شده به مدت ۵۰ دقیقه در ۱۰ سی‌سی آب مقطر (نسبت ۱:۱۰) که دمای آن با استفاده از بن ماری به ۶۰ درجه سانتی‌گراد رسیده بود، قرار داده شد (نمونه تازه‌استفاده‌شده برای خشک‌کردن به تکه‌های ۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر برش داده شد). در فواصل زمانی ده دقیقه نمونه‌ها از محلول خارج و با کاغذ صافی رطوبت سطحی اضافی آنها گرفته، توزین و سپس دوباره در آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. دمای آب با ترمومتر اندازه‌گیری و کنترل شد. سپس با رابطه ۱ نسبت افزایش وزن محاسبه و نمودار آن در برابر زمان بازآب‌پوشی رسم شد. آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد (Doymaz & Ismail, 2011).

$$RR = \frac{W_t - W_d}{W_t} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این معادله: RR نسبت بازآب‌پوشی (g/g)، W_d وزن نمونه قبل از بازآب‌پوشی (g)، و W_t وزن نمونه بعد از بازآب‌پوشی در لحظه t (g) است. شایان ذکر است که مقدار رطوبت نمونه‌ها طی فرایند بازآب‌پوشی از طریق روابط موازنه جرم^۳ تعیین شد (Tavakolipour, 2008).

نمونه اسلایس‌شده^۱ (SC): فلفل‌ها در جهت طولی به تکه‌های ۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر برش داده شدند. نمونه شاهد^۲ (B): هیچگونه تیماری روی آنها انجام نگرفت.

خشک‌کردن

خشک‌کردن با هوای داغ

نمونه‌های فلفل که پیش‌فرایند روی آنها صورت گرفته است و یا نمونه شاهد در سه دمای ۵۵، ۶۵، و ۷۵ درجه سانتی‌گراد در یک خشک‌کن جابه‌جایی هوای داغ مجهز به فن گردش هوا با سرعت ۱ متربرثانیه (ساخت شرکت گروک، ایران) تا رسیدن به محتوای رطوبت نهایی حدوداً ۰/۱۱۱ (مبنای خشک) خشک شدند. شایان ذکر است که دانسیته سطحی نمونه تازه فلفل قرمز روی سینی (ابعاد سینی خشک‌کن به ترتیب طول و عرض سینی ۵۰×۵۰ سانتی‌متر، مقدار فلفل ورودی به خشک‌کن در هر نوبت ۳۰ گرم بود) خشک‌کن 120 g/m^2 اندازه‌گیری شد. قبل از انجام هر آزمایش به مدت سی دقیقه دستگاه خشک‌کن روشن شد تا به دمای مورد نظر برسد. در طی خشک‌شدن وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد. در انتها به مدت ۱۵ دقیقه نمونه‌ها تا دمای محیط خنک و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی شد. میزان رطوبت نهایی فلفل‌های خشک با روش‌های آفتابی و خشک‌کردن با جابه‌جایی هوای داغ به‌طور میانگین به ترتیب ۰/۱۸۶۲ (مبنای خشک) و ۰/۰۹۲ (مبنای خشک) اندازه‌گیری شد. هر کدام از آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد.

خشک‌کردن در آفتاب (خشک‌کردن سنتی)

نمونه‌های فلفل پیش‌فرایندشده به هر سه روش و شاهد، روی یک پارچه متقال تمیز در مقابل تابش مستقیم نور خورشید به مدت ۴ روز تا رسیدن به محتوای رطوبت نهایی حدوداً ۰/۱۱۱ (مبنای خشک) قرار داده شد. هر ساعت نمونه‌ها توزین و تغییرات وزن محاسبه شد. توزین نمونه‌ها از ساعت ۹ صبح تا ۵ بعدازظهر انجام گرفت. چون طی ساعت‌های ۵ بعدازظهر تا ۹ صبح کاهش رطوبت چندانی مشاهده نمی‌شد (البته گاهی تغییرات محتوای رطوبت در ساعات سردتر شبانه‌روز منفی بود یعنی به‌صورت بازجذب رطوبت). شایان توضیح است که آزمایش‌های خشک‌کردن آفتابی در مهرماه انجام شد که شکل ۱ میانگین دما و رطوبت نسبی در طول روز را در این ماه در شهر

مدل سازی سینتیک بازآب پوشی

برای تخمین ضرایب انتشار رطوبت در طول دوره بازآب پوشی از قانون دوم فیک استفاده شد. این معادله برای یک تیغه نامحدود به صورت رابطه ۲ بیان می شود (Crank, 1975; García-Pascual, 2006).

(رابطه ۲)

$$X_t = X_e + (X_i - X_e) \frac{\lambda}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff, w} t}{4L^2} \right]$$

در این معادله: X_t مقدار رطوبت مواد طی بازآب پوشی (kg water/kg db) در لحظه t ، X_i مقدار رطوبت مواد خشک (kg water/kg db)، X_e مقدار رطوبت تعادلی مواد بازآب پوشی شده (kg water/kg db)، t زمان بازآب پوشی (دقیقه)، L نیم ضخامت تیغه برحسب متر، و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (برحسب m^2/s) است. با در نظر گرفتن جمله اول بسط معادله ۲ داریم:

(رابطه ۳)

$$X_t = X_e + (X_i - X_e) \frac{\lambda}{\pi^2} \exp \left[\frac{-D_{eff, w} \pi^2 t}{4L^2} \right]$$

مدل پیشنهادی توسط Peleg (1988) برای توصیف انتقال رطوبت طی بازآب پوشی بوده که دو پارامتری و غیرنمایی است.

$$X_t = X_i + \left[\frac{t}{A + B.t} \right] \quad \text{(رابطه ۴)}$$

با ساده سازی داریم:

$$X_t - X_i = \left[\frac{t}{A + B.t} \right] \quad \text{(رابطه ۵)}$$

در این معادله: X_t مقدار رطوبت مواد طی فرایند بازآب پوشی (kg water/kg db)، X_i مقدار رطوبت مواد خشک (kg water/kg db)، t زمان بازآب پوشی (min)، A ثابت نرخ پلگ^۱ (kg water / kg db min) بوده و به آهنگ انتقال جرم در لحظه ابتدایی مرتبط است ($t=t_0$) و B ثابت ظرفیت پلگ^۲ (kg db / kg water) بوده و به حداکثر ظرفیت جذب آب مرتبط است. شایان ذکر است که در لحظه اولیه ($t=0$)، X_t برابر X_i یعنی مقدار رطوبت مواد خشک (kg / kg db) است. همچنین برای مدل سازی از نرم افزارهای سیگما پلات^۳ نسخه ۱۱ و نرم افزار صفحه گستر اکسل^۴ نسخه ۲۰۰۳ استفاده شد.

تجزیه و تحلیل آماری

آنالیز آماری با استفاده از طرح کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین داده با استفاده از آزمون LCD در سطح احتمال ۹۵ درصد انجام گرفت. برای آنالیز آماری از نرم افزار Statistix نسخه ۸ استفاده شد.

نتایج و بحث

فرایند خشک کردن

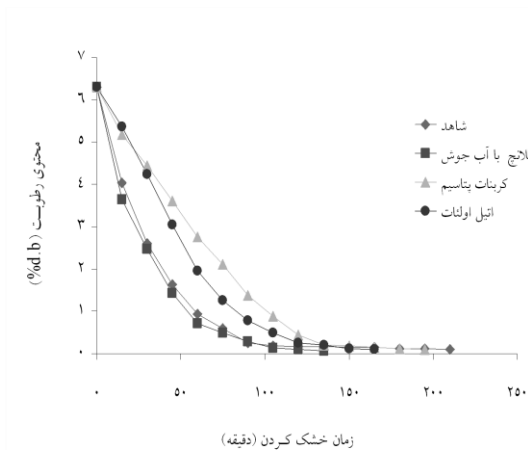
خشک کردن فلفل قرمز چیلی در شرایط خشک کردن با هوای داغ و آفتابی همراه با پیش تیمارهای گوناگون، بررسی شد. مقدار رطوبت اولیه فلفل تازه ۶/۲۹ درصد (بر مبنای خشک) تعیین شد. منحنی تغییرات محتوای رطوبت برحسب زمان خشک کردن در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، تغییرات رطوبت فلفل قرمز چیلی در برابر زمان خشک کردن از روندی نزولی تبعیت کرده است. به طوری که شیب منحنی خشک کردن فلفل قرمز چیلی در نمونه تیمار شده با اتیل اولئات، تندتر است ($p < 0.05$). نتایج Doymaz (2002) در زمینه خشک کردن فلفل با پیش تیمارهای گوناگون نشان داد که فلفل های خشک شده با اتیل اولئات ۲ درصد آهنگ خشک کردن را تسریع و زمان خشک کردن را کوتاه تر کرد. این حالت به علت واکنش حل کنندگی اتیل اولئات است که پوسته مومی و دیواره ی اخته فلفل قرمز را در خود حل می کند و سبب کاهش مقاومت در برابر انتقال جرم (رطوبت) و در نتیجه کاهش زمان خشک کردن فلفل قرمز می شود (Tavakolipour, 2010).

محتوای رطوبت تعادلی در انتهای فرایند خشک کردن برای پیش تیمارهای گوناگون در جدول ۱ ارائه شده است. این مقادیر نشان دهنده محتوای رطوبت اولیه برای فرایند بازآب پوشی است.

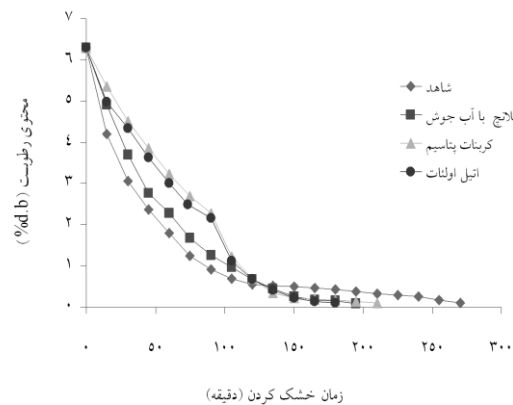
جدول ۱. محتوای رطوبت تعادلی فلفل قرمز چیلی در پایان فرایند خشک کردن

تیمار	رطوبت تعادلی (مبنای خشک)		
	۵۵	۶۵	۷۵
شاهد	۰/۱	۰/۰۹۸	۰/۰۹۵
آنزیم بری با آب جوش	۰/۰۸۶	۰/۰۷۵	۰/۰۹۸
کربنات پتاسیم	۰/۰۹۸	۰/۰۹۸	۰/۰۹۸
اتیل اولئات	۰/۱۰۴	۰/۱	۰/۰۹۷

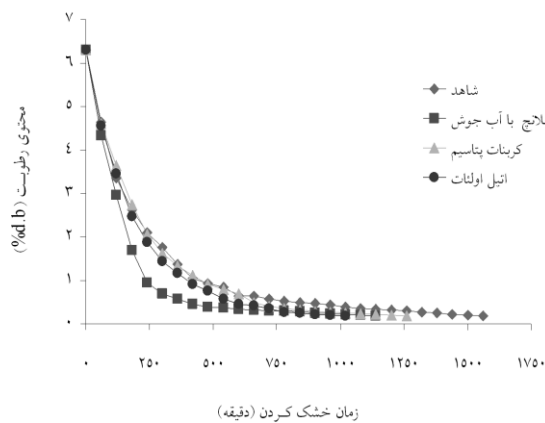
1. Peleg rate constant
2. Peleg capacity constant
3. Sigma Plot
4. Excel



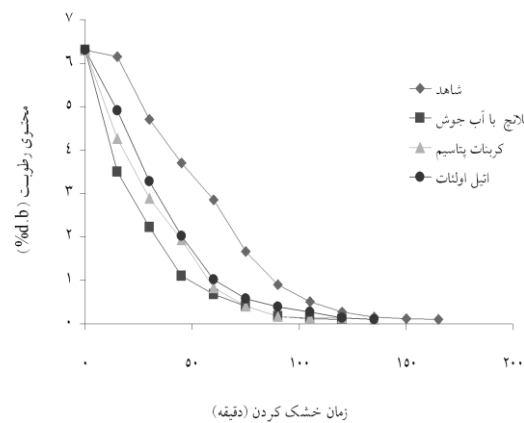
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

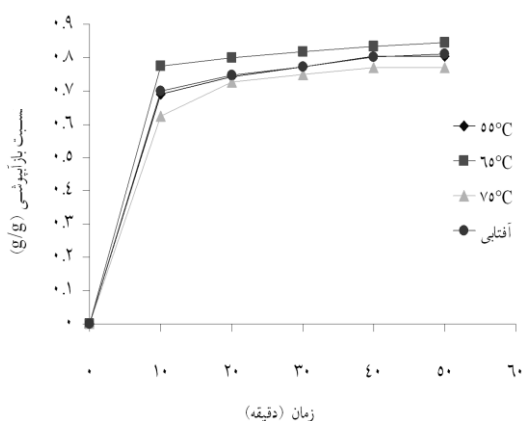
شکل ۲. تغییرات محتوای رطوبت نمونه‌های فلفل قرمز چیلی بر حسب زمان خشک کردن همراه با پیش تیمارهای گوناگون: (الف) دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد، (ب) دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد، (ج) دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد، (د) و (ه) آفتاب‌پزی

نسبت بازآب‌پوشی بیشتر است ولی در روش آفتاب‌پزی به دلیل زمان خشک کردن بسیار طولانی منافذ و لوله‌های مویین فلفل قرمز دستخوش تخریب بسیار شدید شده است. Vega (2009) *Gálvez et al.* نتایج مشابهی ارائه کردند. آنها گزارش کردند که روش خشک کردن فرایندی برگشت‌ناپذیر است و تخریب ساختاری ایجاد شده طی فرایند خشک کردن به آفت ظرفیت بازآب‌پوشی نمونه‌ها می‌انجامد. همچنین نتایج *Giri & Prasad* (2002) در زمینه خشک کردن قارچ توسط میکروویو با خلأ و جابه‌جایی هوای داغ نیز در راستای پژوهش حاضر است. در این پژوهش تأثیر فشار، توان میکروویو، و دمای هوای خشک‌کن روی تغییرات بازآب‌پوشی نمونه بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان بازآب‌پوشی نمونه قارچ خشک‌شده با میکروویو بهتر از (در توان ۲۰۰ وات و فشار ۱۵ کیلوپاسکال) روش خشک کردن با خشک‌کن جابه‌جایی هوای داغ (دمای خشک کردن ۶۰ درجه سانتی‌گراد) بود. همچنین نتایج این پژوهشگران نشان داد که کاهش فشار سبب افزایش میزان بازآب‌پوشی نمونه‌ها شد. روند تغییرات میزان بازآب‌پوشی نمونه‌ها با افزایش توان میکروویو نیز

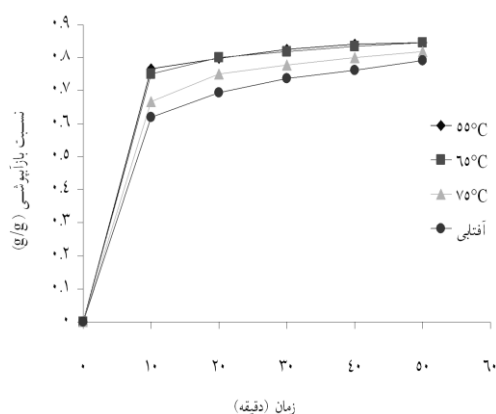
تأثیر دمای هوای خشک کردن بر تغییرات نسبت بازآب‌پوشی منحنی تغییرات نسبت بازآب‌پوشی در برابر زمان بازآب‌پوشی در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تغییرات نسبت بازآب‌پوشی همه نمونه‌ها در برابر زمان صعودی است، به طوری که تقریباً پس از ۱۰ دقیقه تماس نمونه با آب شیب منحنی به سرعت افزایش می‌یابد که نشانه نفوذ سریع آب در لوله‌های مویین فلفل خشک است و سپس نفوذ رطوبت با روند آهسته‌تری ادامه می‌یابد و شیب منحنی ملایم می‌شود و پس از گذشت حدود یک ساعت به تعادل می‌رسد ($p < 0.05$). Vega-Gálvez *et al.* (2009) فرایند بازآب‌پوشی گیاه آلوئه‌ورا را مطالعه کردند. آنها نتایج مشابه را در این خصوص ارائه و بیان کردند که بالاترین روند جذب آب به‌طور ویژه‌ای در آغاز فرایند بازآب‌پوشی مشاهده شد. این پژوهشگران دلیل جذب سریع آب را به دلیل پُرشدن لوله‌های مویین سطحی آزاد و فضاهای درون سلولی نمونه گزارش کردند. همانطور که از نمودارها مشاهده می‌شود در دماهای پایین‌تر (۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد) شدت تخریب منافذ و لوله‌های مویین نسبتاً کمتر و

نشان داد که بیشترین تغییرات بازآب‌پوشی در مراحل ابتدایی فرایند است و با گذشت زمان و پرشدن لوله‌های مویین و رسیدن محصول به تعادل با محیط آبی، از شدت این تغییرات کاسته می‌شود. همچنین نتایج دیگری که در این پژوهش‌ها مشاهده شد، تأثیر دمای هوای خشک‌کردن روی شدت بازآب‌پوشی محصول بود که توضیحات تکمیلی داده شد.

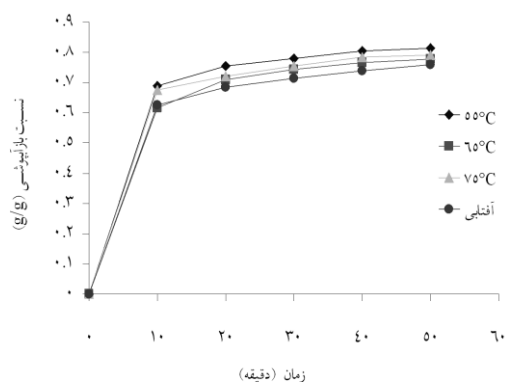
افزایشی بود. بررسی نتایج (Dadali *et al.*, 2008) در زمینه بازآب‌پوشی اسفناج خشک‌شده نشان داد که نمونه‌های خشک‌شده نتوانستند میزان رطوبت اولیه خود را طی بازآب‌پوشی به دست آورند. آنها گزارش کردند که تخریب ساختار بافتی و چروکیدگی سلول‌ها طی خشک‌کردن سبب افت بازآب‌پوشی شد. به‌طور کلی بررسی منابع علمی گوناگون انجام‌شده درخصوص فرایند بازآب‌پوشی محصولات خشک‌شده



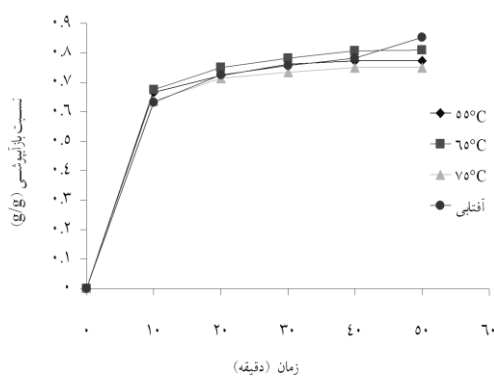
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳. تغییرات بازآب‌پوشی نمونه‌های فلفل قرمز چیلی برحسب زمان بازآب‌پوشی: (الف) شاهد، (ب) آنزیم‌بری با آب‌جوش، (ج) کربنات پتاسیم، و (د) اتیل اولئات

(آنزیم‌بری در آب و سولفیتاسیون^۱) قبل از خشک‌کردن، به بهبود و افزایش ظرفیت بازآب‌پوشی محصول منجر شد. همچنین در پژوهشی مشابه گزارش شد که استفاده از پیش‌تیمار محلول نمکی به دلیل انباشت بلورهای نمک روی فراورده، سبب کاهش بازآب‌پوشی شد (Evranuz *et al.*, 1986). Kaymak-Ertekin (2002) در پژوهشی سینتیک خشک‌کردن و بازآب‌پوشی فلفل قرمز و سبز را مطالعه کرد. این محقق تأثیر دما و سرعت هوا و پیش‌تیمار (آنزیم‌بری با آب داغ،

تأثیر نوع پیش‌فرایند بر تغییرات نسبت بازآب‌پوشی تأثیر نوع پیش‌فرایند بر تغییرات نسبت بازآب‌پوشی فلفل قرمز چیلی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تغییرات نسبت بازآب‌پوشی همه نمونه‌ها در طی زمان بازآب‌پوشی صعودی است، به طوری که این تغییرات به شدت تحت تأثیر نوع پیش‌فرایند است. همچنین پیش‌تیمار آنزیم‌بری با آب‌جوش در مقایسه با سایر پیش‌تیمارها نسبتاً میزان بازآب‌پوشی را افزایش داده است ($p < 0.05$). نتایج تحقیقات (Mazza 1983) نشان داد که به‌کارگیری پیش‌تیمار

جدول ۲. ضرایب ثابت مدل پلگ و مقادیر انتشار مؤثر آب طی بازآب‌پوشی

پیش‌فرایند	دمای خشک‌کردن (°C)	ضریب انتشار رطوبت ($\times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)	مدل پلگ	
			A	B
	۵۵	۴/۸۴۳	۱/۵۷۷۲	۰/۱۳۶۱
	۶۵	۳/۳۷۸	۱/۸۰۹۱	۰/۱۳۴۶
شاهد	۷۵	۲/۹۶۰	۳/۲۹۸۰	۰/۱۴۲۲
	آفتابی	۲/۵۴۱	۴/۲۷۰۲	۰/۱۴۷۰
	۵۵	۵/۵۴۰	۲/۷۷۰۱	۰/۱۶۵۹
آنزیم‌بری با آب	۶۵	۳/۶۰۰	۱/۳۸۰۸	۰/۱۵۱۴
جوش	۷۵	۴/۳۲۹	۳/۰۹۱۵	۰/۲۰۲۱
	آفتابی	۳/۵۱۸	۲/۳۶۷۵	۰/۱۵۳۰
	۵۵	۴/۹۹۵	۲/۴۹۲۵	۰/۲۱۱۱
	۶۵	۵/۳۲۴	۲/۸۷۰۲	۰/۱۵۴۷
کربنات پتاسیم	۷۵	۴/۸۲۳	۲/۶۰۱۶	۰/۲۴۴۰
	آفتابی	۱/۲۱۷	۶/۵۶۵۱	۰/۰۳۰۳
	۵۵	۳/۷۹۰	۲/۶۸۱۶	۰/۱۵۶۳
	۶۵	۳/۷۱۴	۳/۷۹۷۱	۰/۱۸۵۰
اتیل اولفات	۷۵	۴/۱۰۷	۲/۸۶۵۳	۰/۱۸۷۰
	آفتابی	۳/۰۹۳	۳/۳۳۷۲	۰/۲۱۰۶

۱۰ × ۵/۵۴۰ قرار دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

۱. بیشترین آهنگ جذب رطوبت در تمامی نمونه‌ها، طی ۱۰ دقیقه اول فرایند است که نشانه نفوذ سریع آب در لوله‌های موئین فلفل خشک است و سپس نفوذ رطوبت با آهنگ آهسته‌تری ادامه می‌یابد و شیب منحنی ملایم می‌شود و پس از گذشت حدود یک ساعت به تعادل می‌رسد.
۲. مدل سینتیکی پلگ توانست با دقت بالایی مقدار جذب رطوبت را طی فرایند بازآب‌پوشی پیش‌بینی کند ($R^2 \geq 0.9320$).
۳. مقادیر ضرایب انتشار رطوبت حین بازآب‌پوشی در فلفل قرمز چیلی در دامنه $1/217 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $5/540 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

۴. پیش‌تیمار آنزیم‌بری با آب جوش در مقایسه با سایر پیش‌تیمارها میزان بازآب‌پوشی را نسبتاً افزایش داده است که بیشترین مقدار این پارامتر در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد.
- به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری پیش‌تیمارهای گوناگون قبل از خشک‌کردن فلفل قرمز می‌تواند از نظر بهبود خصوصیات کیفی محصول سودمند باشد به‌طوری که با این روش می‌توان کیفیت مطلوب محصول اولیه را در مدت زمان کوتاه‌تری بازیابی کرد.

REFERENCES

- Akintunde, T. (2010). Effect of pretreatment on drying time and quality of chilli pepper. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34, 595-608.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (2nd ed.). London, UK: Oxford University Press
- Cunningham, S.E., McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. & Richardson, P.S. (2008). Experimental study of rehydration kinetics of potato cylinders. *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 86, 15-24.
- Dadali, G., Demirhan, E. & Özbek, B. (2008). Effect of drying conditions on rehydration kinetics of microwave dried spinach. *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 86, 235-241.
- Debnath, S., Hemavathy, J., Bhat, K.K. & Rastogi, N.K. (2004). Rehydration characteristics of osmotic pretreated and dried onion. *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 82, 304-310.
- Doymaz, I. & Pala, M. (2002). Hot-air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 55, 331-335.
- Doymaz, I. (2010). Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of

- Amasya red apples. *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 88, 124-132.
- Doymaz, I. & Ismail, O. (2011). Drying characteristics of sweet cherry. *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 89, 31-38.
- Evranuz, Ö., Teke, I., Damarli, E. & Dityapak, I. (1986). Bazi meyve ve sebzelere uygulanan degisik ön işlemlerin kuruma hizina ve su alma özelliklerine etkileri. 107., Gebze: TÜBITAK, MAE.
- García-Pascual, P., Sanjuán, N., Melis, R. & Mulet, A. (2006). Morchella esculenta (morel) rehydration process modeling. *Journal of Food Engineering*, 72(4), 346-353.
- Giri, S.K. & Prasad, S. (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78, 512-521.
- Isiduro, E., Cotter, D.J., Fernandez, G.C.J. & Southward, G.M. (1995). Color retention in red chile powder as related to delayed harvest. *Journal of Food Science*, 60(5), 1075-1077.
- Jiao, A., Xu, X. & Jin, Z. (2014). Modelling of dehydration–rehydration of instant rice in combined microwave-hot air drying. *Food and Bioproducts Processing*, 92(3), 259-265.
- Kaymak-Ertekin, F. (2002). Drying and Rehydrating Kinetics of Green and Red Peppers. *Journal of Food Science*, 67(1), 168-175.
- Mazza, G. (1983). Dehydration of carrots. Effect of pre-drying treatments on moisture transport and product quality. *Journal of Food Technology*, 18, 113-123.
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216-1219.
- Rastogi, N.K., Nayak, C.A. & Raghavarao, K.S.M.S. (2004). Influence of osmotic pre-treatments on rehydration characteristics of carrots. *Journal of Food Engineering*, 65, 287-292.
- Taiwo, K.A., Angersbach, A. & Knorr, D. (2002). Rehydration studies on pretreated and osmotically dehydrated apple slices. *Journal of Food Science*, 67(2), 842-847.
- Tavakolipour, H. (2008). Principles of food engineering. Ayiizh publications. (In Farsi)
- Tavakolipour, H. (2010). Principles of drying food materials and agricultural products. Ayiizh publications (In Farsi).
- Vega-Gálvez, A., Notte-Cuello, E., Lemus-Mondaca, R., Zura, L. & Miranda, M. (2009). Mathematical modelling of mass transfer during rehydration process of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 87, 254-260.