مطالعه تاثیر پیش تیمارهای مختلف بر روی فرآیند آبزدایی فلفل قرمز چیلی (*Capsicum annum*) و بررسی مدلسازی سینتیک خشک کردن

حمید توکلی‌پور[1*]، محسن مختاریان[2] ، لیلا زیرجانی[3]

[1] دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران
[2] باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران
[3] دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران

تاریخ دریافت: 1392/4/31 تاریخ پذیرش: 1393/2/26

چکیده

هدف اصلی این تحقیق، بررسی تاثیر پارامترهای روش آبزدایی و نوع پیش فرآیند، دمای و زمان خشک کردن بر روی فرآیند آبزدایی فلفل قرمز چیلی می‌باشد. فرآیند آبزدایی فلفل قرمز در دو روش هوای داغ (در سه دمای 55، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد) و آفتابی همراه با پیش تیمارهای آنزیم‌بری با آب جوش، کربنات پتاسیم و اتیل اولئات انجام گرفت. نتایج نشان داد که به کارگیری روش پیش فرآیند آنزیم‌بری با آب جوش و دمای هوای 75 درجه سانتی‌گراد، توانست سرعت خشک کردن را به بیشینه مقدار خود برساند که تحلیل آماری نشان داد هیچ گونه اختلاف آماری معناداری با تیمارهای (آنزیم‌بری با آب جوش و دمای هوای خشک کردن 65 درجه سانتی‌گراد)، (اتیل اولئات و دمای هوای 75 درجه سانتی‌گراد) و (کربنات پتاسیم و دمای هوای 75 درجه سانتی‌گراد) مشاهده نگردید ($p<0/01$). بنابراین با توجه به اینکه در دمای کمتر خصوصیات تغذیه‌ای محصول تولیدی بهتر حفظ می‌گردد، بنابراین نمونه فلفل قرمز تیمار شده با (آنزیم‌بری با آب جوش و 65 درجه سانتی‌گراد) به عنوان بهترین تیمار معرفی گردید. نتایج مدلسازی نشان داد که مدل لگاریتمی به دلیل بالاترین R^2 و کمترین χ^2 و RMSE به عنوان بهترین مدل جهت پیش‌بینی منحنی خشک کردن فلفل قرمز چیلی انتخاب گردید.

واژه های کلیدی: فلفل قرمز، پیش فرآیند، مدلسازی، سینتیک خشک کردن.

نویسنده مسوول: h.tavakolipour@gmail.com

Archive of SID

www.SID.ir

1- مقدمه

فلفل قرمز چیلی[1] یکی از ارقام فلفل بوده که به طور وسیعی در جهان مورد کشت و کار قرار می‌گیرد. این محصول به صورت تازه و پخته شده مصرف می شود و به طور معمول بیشتر به صورت یک ادویه و طعم‌دهنده در مواد غذایی و نیز در فرمولاسیون انواع سس‌ها، چاشنی‌ها و فرآورده های کنسروی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ایسیدورو[2] و همکاران، 2010). فلفل قرمز چیلی یکی از منابع خوب از لحاظ ویتامین‌های آ و ث و غنی از بتا کاروتن و مواد معدنی نظیر پتاسیم می‌باشد (آکین‌تونده[3]، 2010).

فلفل قرمز چیلی معمولاً پس از برداشت خشک می‌گردد. خشک کردن فلفل قرمز در حاضر به روش سنتی توسط خشک کردن در هوای آزاد در معرض نور خورشید انجام می‌گیرد. این عمل معمولاً در مدت زمان طولانی حدود ده روز به طول می‌انجامد. بنابراین با توجه به نقاط ضعف و معایب روش خشک کردن آفتابی از نظر بهداشتی نظیر آلودگی ثانویه و وقت‌گیر بودن، روش‌های دیگر نظیر خشک کردن خورشیدی و یا جابجایی هوای داغ پیشنهاد می‌گردد (آکین‌تونده، 2010). این روش‌های از مزایای بالا بودن سرعت فرایند خشک کردن و تولید فرآورده‌ای کاملاً بهداشتی برخوردار هستند.

به کارگیری روش‌های پیش‌تیمار مختلف، به منظور کاهش زمان خشک کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای خشکبار، امروزه جایگاه ویژه‌ای را در صنعت فرآورش مواد غذایی نمایان نموده است. پیش‌تیمارهای مختلفی به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنزیم‌بری کردن، آبگیری اسمزی و بکارگیری ترکیبات شیمیایی (پتاسیم‌متابی‌سولفات[4]، هیدروکسیدپتاسیم و سدیم[5]، کربنات پتاسیم[6]، امولسیون‌های استر اتیل و متیل[7]، اسید سیتریک[8]، اسید آسکوربیک[9]) از جمله پیش تیمارهایی بوده که در صنعت خشکبار مورد استفاده قرار می‌گیرد (دویمز[10]، 2010). هدف از استفاده از محلول‌های پیش فرآیند، افزایش آهنگ خشک کردن و تولید فرآورده‌ای با کیفیت مطلوب مناسب می‌باشد. بکارگیری پیش فرآیندهای بکار رفته می‌تواند از طریق حذف مقاومت سطحی میوه‌ها و سبزیجات توسط غوطه‌ور کردن محصول در تیمارهای شیمیایی و یا آب داغ، آهنگ خشک کردن را شتاب داد. نتایج بدست آمده از تحقیقات دویماز و پالا[11] (2000) نشان داد که فلفل‌های پیش تیمار شده نسبت به انواع بدون پیش تیمار، سریع‌تر خشک شده و کیفیت رنگ بالاتری داشتند. آکین‌تنده (2010) تاثیر روش‌های خشک کردن و پیش تیمارهای مختلف را روی زمان خشک کردن و ویژگی‌های کیفی فلفل چیلی بررسی نمود. او انواع روش‌های آنزیم‌بری همراه با پیش فرآیند آبگیری اسمزی در غلظت های ساکارز 60 و 70 درجه بریکس را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که نمونه‌های فلفل پیش تیمار شده نسبت به نمونه‌های بدون پیش تیمار سریعتر خشک شدند. همچنین نمونه‌های خشک شده در روش آفتابی محتوای ارزش تغذیه‌ای بالاتری نسبت به سایر روش‌ها داشت. ژائو[12] و همکاران (2013) تاثیر پیش تیمار آبگیری را روی ویژگی‌های چیلی‌های خشک شده به روش هوای داغ و مایکروویو مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های پیش فرآیند شده در محلول دوگانه 10% نمک و 50% ساکارز، بهترین نتایج آبگیری را نسبت به حالت محلول یگانه نمک و ساکارز به تنهایی نشان دادند. همچنین نتایج نشان داد که نمونه‌های خشک شده به روش مایکروویو در توان 60 وات بعد از آبگیری اسمزی، محتوای ویتامین ث بالاتر و کیفیت رنگ بهتری داشت. ایوب حسین[13] و همکاران (2007) ویژگی‌های خشک کردن لایه نازک و سینتیک تغییرات رنگ چیلی قرمز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش دمای هوای خشک کردن و کاهش رطوبت نسبی، آهنگ خشک کردن افزایش یافت. نمونه‌های خشک شده با آنزیم‌بری آهنگ خشک شدن بالاتری نسبت به نمونه بدون آنزیم‌بری داشتند. همچنین نتایج نشان داد که مدل نیوتنی توصیف بهتری از روند خشک کردن را نشان داد. دویماز و پالا (2002) ویژگی‌های خشک کردن با هوای داغ فلفل قرمز را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که نمونه‌های پیش فرآیند شده نسبت به انواع غیر پیش فرآیند، سریعتر خشک شده و مقادیر L^*، a^* و b^* بالاتری نسبت به انواع

[1] - Chilli red pepper
[2] - Isiduro
[3] - Akintunde
[4] - Potassium meta bisulphate
[5] - Potassium and sodium hydroxide
[6] - Potassium carbonate
[7] - Methyl and ethyl ester
[8] - Citric acid
[9] - Ascorbic acid
[10] - Doymaz
[11] - Pala
[12] - Zhao
[13] - Ayub Hossain

Archive of SID

www.SID.ir

بدون پیش فرآیند داشتند. در بین پیش فرآیندهای بکار رفته، پیش فرآیند 2% اتیل اولئات و 5% کربنات پتاسیم نتایج بهتری نسبت به سایر پیش فرآیندها داشت. همچنین نتایج مدلسازی تجربی نشان داد که مدل پیج نتایج دقیقتری از توصیف منحنی خشک کردن نسبت به مدل نمایی دارد.

هدف از این تحقیق، بررسی فرآیند خشک کردن فلفل قرمز چیلی با هوای داغ و روش آفتابی و بررسی تاثیر پارامترهای روش‌های پیش فرآیند، دمای و زمان خشک کردن بر ویژگی‌های سینتیکی خشک کردن فلفل قرمز می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مواد

جهت انجام این پژوهش فلفل واریته capsicum annum به عنوان ماده اولیه از یک فروشگاه محلی در شهر نیشابور خریداری شد. همچنین مواد شیمیایی مورد استفاده شامل اتیل اولئات (دارای خلوص 98 درصد) و کربنات پتاسیم (دارای خلوص 99 درصد) بوده که ساخت شرکت مرک آلمان بودند.

2-2- روش‌ها

2-2-1- آماده‌سازی مواد اولیه

پس از خریداری فلفل، به منظور کاهش فعالیت‌های تنفسی و بیولوژیکی تا زمان آزمایش در یخچال در دامنه دمایی 4/6 -7/2 درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید. پس از خروج از یخچال نمونه‌ها تمیز و مواد خارجی جدا شدند و توسط کولیس طول، عرض، ضخامت و وزن آنها اندازه‌گیری شد. نمونه‌هایی برای فرآیند خشک کردن انتخاب شدند که اندازه آنها به یکدیگر نزدیک بود و در دامنه میانگین جامعه قرار داشتند و نمونه‌هایی که اندازه آنها از متوسط، انحراف بیشتری داشت حذف گردید. در هر آزمون 30 گرم فلفل مورد استفاده قرار گرفت.

2-2-2- پیش فرآیندها

پیش فرآیندهای مورد استفاده جهت خشک کردن فلفل قرمز چیلی به صورت زیر انتخاب گردید:

- آنزیم‌بری با آب داغ[1] (WB) : نمونه‌های فلفل در آب داغ با دمای 90 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 دقیقه آنزیم‌بری شدند و سپس روی یک توری فلزی قرار گرفته تا آب اضافی آنها خارج شود.
- تیمار شیمیایی[2] (CT): نمونه‌های فلفل به طور جداگانه در محلول 2% اتیل اولئات و 5% کربنات پتاسیم به مدت 1 دقیقه در دمای اتاق فروبری شد.
- نمونه اسلایس شده[3] (SC): فلفل‌ها در جهت طولی به تکه‌های 2/5 × 2/5 سانتی متر برش داده شد.
- نمونه شاهد[4] (B) : هیچگونه تیماری بر روی آنها انجام نگرفت.

2-2-3- خشک کردن

2-2-3-1- خشک کردن با هوای داغ

نمونه‌های فلفل که پیش فرآیند بر روی آنها صورت گرفته و یا نمونه شاهد در سه دمای 55، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد در یک خشک‌کن جابجایی هوای داغ مجهز به فن گردش هوا (ساخت شرکت گروک ، ایران) تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. قبل از انجام هر آزمایش به مدت سی دقیقه دستگاه خشک‌کن روشن شد تا به دمای مورد نظر برسد. در طی خشک شدن وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی 15دقیقه‌ای با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت 0/001 اندازه‌گیری گردید. در انتها به مدت 15 دقیقه نمونه‌ها خنک و در کیسه‌های پلی اتیلنی بسته‌بندی شد. هر کدام از آزمایشات در سه تکرار انجام شد.

2-2-3-2- خشک کردن در آفتاب (خشک کردن سنتی)

نمونه‌های فلفل پیش فرایند شده به هر سه روش و شاهد، بر روی یک پارچه متقال تمیز در مقابل تابش مستقیم نور خورشید به مدت چند روز تا رسیدن به وزن ثابت قرار داده شدند. هر یک ساعت نمونه‌ها وزن شدند و تغییرات وزن محاسبه گردید. وزن‌کشی نمونه‌ها از ساعت 9 صبح تا 5 بعد از ظهر انجام گرفت. چون طی ساعت‌های 5 بعد از ظهر تا 9 صبح کاهش رطوبت قابل ملاحظه‌ای اتفاق می‌افتاد. لازم به توضیح است که آزمایشات خشک کردن آفتابی در مهر ماه انجام شد که شکل (1) میانگین دما و رطوبت نسبی در طول روز را در این ماه در شهر نیشابور نشان می‌دهد. همچنین میانگین حداکثر سرعت باد طی این ماه

[1] - Water blanching (WB)

[2] - Chemical treatment (CT)
[3] - Slice (SC)
[4] - Blank (B)

Archive of SID

www.SID.ir

طبق داده‌های ایستگاه هواشناسی منطقه، $7m.s^{-1}$ ثبت گردید. هر یک از آزمایشات خشک کردن در سه تکرار انجام شد.

شکل 1- میانگین دما و رطوبت نسبی در طول روز طی فرآیند خشک فلفل قرمز در آفتاب.

2-2-4- مدلسازی سینتیک خشک کردن

در این تحقیق نسبت رطوبت نمونه‌های فلفل قرمز چیلی توسط معادلهٔ زیر محاسبه گردید:

$$MR = \frac{(X_t - X_e)}{(X_0 - X_e)} \qquad (1)$$

در این معادله X_t مقدار رطوبت در لحظه‌t، X_0 مقدار رطوبت اولیه و X_e مقدار رطوبت تعادلی می‌باشد. مدل‌های منحنی خشک کردن لایه‌ای نازک فلفل قرمز چیلی بر اساس مدل‌های توصیه شده توسط محققانی که در این زمینه کار نموده‌اند طبق جدول (1) انتخاب گردید. در این مطالعه مدلسازی ریاضی توسط نرم افزار کامپیوتری سیگما پلات[1] نسخه 11 شبیه‌سازی گردید. منحنی‌های خشک کردن توسط هفت مدل ریاضی مختلف که به طور گسترده ای برای مواد بیولوژیکی و بیشتر مواد غذایی بکار می‌رود، مورد برازش قرار گرفت (مختاریان و کوشکی، 1391؛ دویمز، 2010).

جدول 1- مدل‌های سینتیکی برای پیش بینی رفتار خشک کردن مواد غذایی و زیستی

نام مدل	معادله مدل
نیوتن[2]	$MR = \exp(-kt)$
پیج[3]	$MR = \exp(-kt^n)$
هندرسون و پابیس[4]	$MR = a\exp(-kt)$
لگاریتمی[5]	$MR = a\exp(-kt) + C$
تامسون[6]	$t = a\ln(MR) + b(\ln(MR))^2$
سهمی‌وار[7]	$MR = a + bt + ct^2$
دو جمله‌ای نمایی[8]	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$

در این تحقیق برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف کننده سینتیک خشک کردن لایه‌ای نازک فلفل قرمز، ضریب تبیین[9] (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا[10] (RMSE) و مربع کای (χ^2[11]) در 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 می‌گردد.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{n}^{i=1}(M\,R_{exp} - MR_{pre})^2}{\sum_{n}^{i=1}(M\,R_{exp} - \overline{MR})^2}\right] \qquad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2\right)} \qquad (2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - Z} \qquad (3)$$

در این معادلات $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت فلفل قرمز مشاهده شده در iامین اندازه‌گیری، $MR_{per,i}$ نسبت رطوبت فلفل قرمز پیش‌بینی شده مدل در iامین اندازه‌گیری، $\overline{MR}$ نسبت رطوبت تجربی میانگین،N تعداد مشاهدات و z تعداد ضرایب مدل می‌باشد. برای سنجش بهترین مدل جهت پیش‌بینی نحوه‌ی خشک شدن فلفل قرمز چیلی معیارهای R^2، RMSE و χ^2 مورد ارزیابی قرار

[1] - Sigma Plot

[2] - Newton
[3] - Page
[4] - Henderson &Pabis
[5] - Logarithmic
[6] - Thomson
[7] - Parabolic
[8] - Two-term exponentioal
[9] - Coefficient of determination (R^2)
[10] - Root mean square error (RMSE)
[11] - Chi-square (χ^2)

Archive of SID

www.SID.ir

گرفت. در نهایت مدل یا مدل های خشک کردن با بیشینه ضریب تبیین R^2 و کمینه پارامترهای RMSE و χ^2 به عنوان مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک کردن فلفل قرمز انتخاب گردید (مختاریان و کوشکی، 1391؛ دویمز، 2010).

2-2-5- بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن

بهینه فرآیند خشک کردن فلفل قرمز به روش امتیازدهی مهمترین شاخص‌های مؤثر در فرآیند انجام گرفت. به طوری که شاخص مورد بررسی با بالاترین مقدار بیشترین امتیاز (4 ستاره، ****) و شاخص با کمترین مقدار (بدون ستاره) بود. همچنین از متغیرهای زبانی امتیاز متوسط (3 ستاره، ***)، امتیاز کم (2 ستاره، **) و امتیاز خیلی کم (1 ستاره، *) نیز برای سایر مقادیر استفاده شد.

3- نتایج و بحث

3-1- منحنی‌های خشک کردن

در این پژوهش فرآیند خشک کردن فلفل قرمز چیلی در شرایط خشک کردن با هوای داغ در دمای مختلف و آفتاب همراه با پیش فرآیندهای مختلف، تحت فرآیند خشک کردن قرار گرفت. مقدار رطوبت اولیه فلفل تازه 80-90 درصد (بر مبنای وزن مرطوب) با استفاده از آون در دمای 105 درجه سانتیگراد تعیین گردید (1990، AOAC). منحنی تغییرات محتوای رطوبت در برابر زمان خشک کردن در شکل‌های (2) تا (5) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، تغییرات رطوبت فلفل قرمز چیلی در برابر زمان خشک کردن از یک روند نزولی تبعیت نموده است. به طوری که شیب منحنی خشک کردن فلفل قرمز چیلی در نمونه تیمار شده با اتیل اولئات، تندتر می‌باشد. نتایج دویماز (2002) در مورد خشک کردن فلفل با پیش فرآیندهای مختلف نشان داد که فلفل‌های خشک شده با اتیل اولئات 2% سرعت خشک کردن را تسریع و زمان خشک کردن را کوتاه نمود. این حالت به علت واکنش حل‌کنندگی اتیل اولئات بوده که پوسته مومی و دیوارهٔ یاختهٔ فلفل قرمز را در خود حل نموده و سبب کاهش زمان خشک کردن فلفل قرمز می‌گردد (توکلی‌پور، 1389).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل نوع پیش فرآیند و دمای هوای خشک کردن فلفل قرمز چیلی بر زمان و آهنگ خشک کردن در سطح احتمال 99% معنادار نگردید ($P<0/01$).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنادار[1] در جدول (2) نشان داده شده است. باتوجه به جدول 2 مشخص می شود که نمونه فلفل قرمز چیلی آنزیم‌بری شده با آب جوش و خشک شده در دمای 75 درجه سانتی‌گراد دارای بالاترین آهنگ خشک کردن و کوتاه‌ترین زمان خشک کردن است. همچنین نتایج حاکی از آن بود که نمونه شاهد فلفل قرمز چیلی خشک شده به روش آفتابی دارای کمترین آهنگ خشک کردن و بیشترین زمان خشک کردن بود. آکین‌تنده (2010، 2011) در مورد خشک کردن فلفل چیلی قرمز تحت شرایط پیش فرآیندهای مختلف نشان داد که نمونه پیش فرآیند شده در آنزیم‌بری با آب جوش زمان خشک کردن فلفل قرمز را در هر سه روش خشک کردن آفتابی[2]، خورشیدی[3] و هوای داغ[4] شتاب بخشید. به طور مشابه دویماز (2010) فرآیند خشک کردن سیب قرمز را در دو پیش فرآیند غوطه‌وری در اسید سیتریک و آنزیم‌بری با آب داغ مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که هر دو روش پیش فرآیند، زمان خشک کردن را نسبت به نمونه کنترل (شاهد) کوتاه نمود. به طوری که نتایج مذکور نشان داد که نمونه پیش فرآیند شده با اسید سیتریک آهنگ خشک کردن را شتاب بیشتری داد.

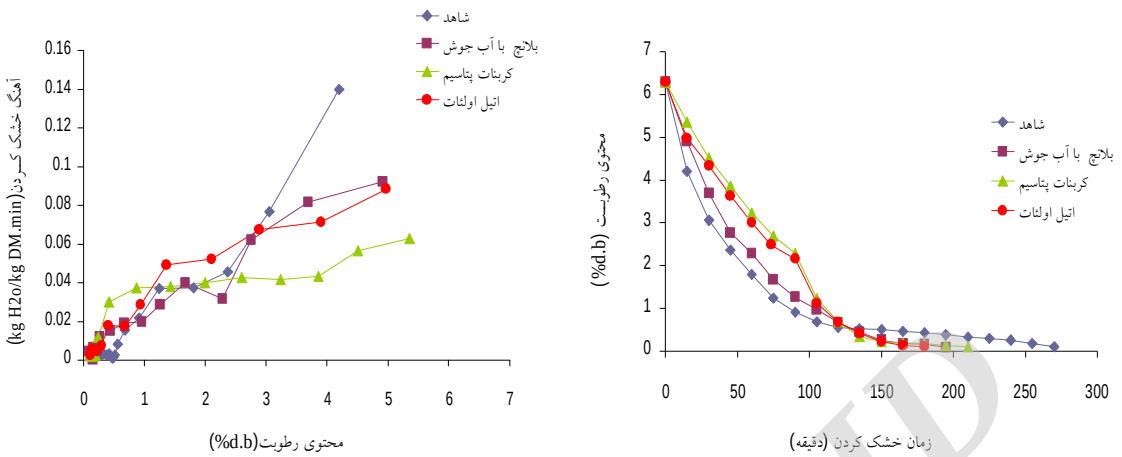
3-2- بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن

جهت تعیین شرایط بهینه خشک کردن فلفل قرمز در بین تیمارهای مورد بررسی، با استفاده از ارزیابی و امتیازدهی پارامترهای سینتیکی و با در نظر گرفتن زمان و آهنگ خشک کردن شرایط بهینه تعیین گردید. شرایط بهینه برای بهترین فلفل قرمزهای چیلی خشک شده، شامل کمترین زمان خشک کردن و بیشترین آهنگ خشک کردن می‌باشد. فرآیند امتیازدهی در مورد پارامترهای سینتیکی با 4 ستاره (****) آغاز شد به طوری که تا حد لازم صحت امتیازدهی تایید گردد. حال با توجه به قید های بالا، به تیمارهای مورد بررسی امتیاز داده شد و نتایج در جدول (3) ثبت گردید.

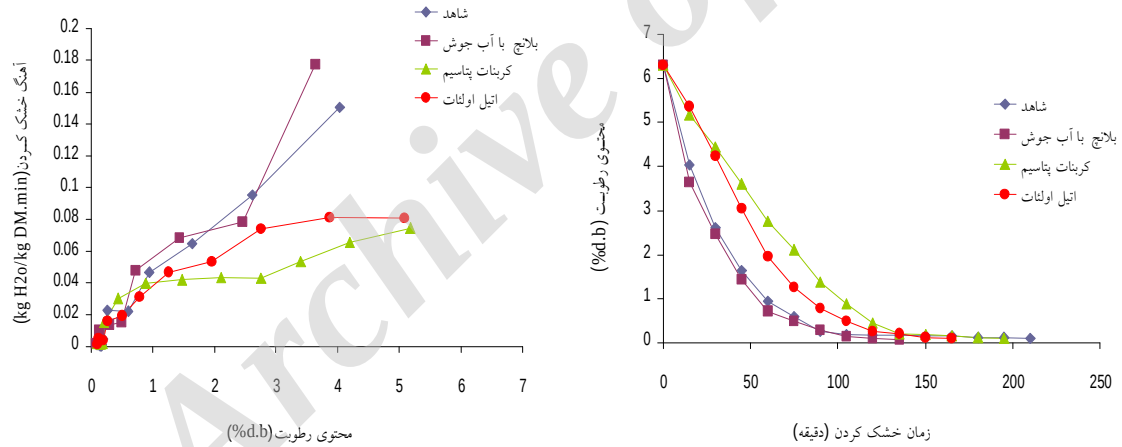
[1] - Least significant difference (LSD)
[2] - Sun drying
[3] - Solar drying
[4] - Hot air drying

Archive of SID

www.SID.ir



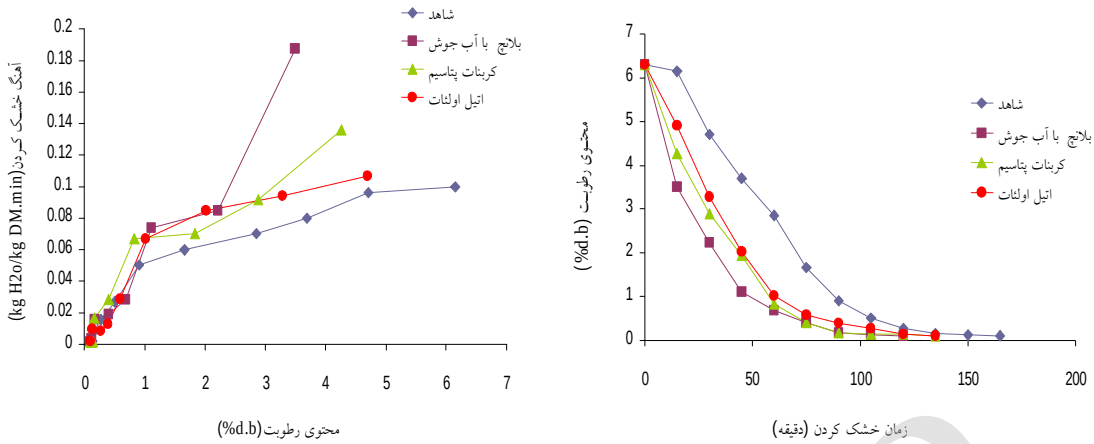
شکل 2- تغییرات محتوای رطوبت (راست) و آهنگ خشک کردن (چپ) نمونه‌های فلفل قرمز چیلی خشک شده در هوای داغ 55 درجه سانتی‌گراد همراه با پیش تیمارهای مختلف.



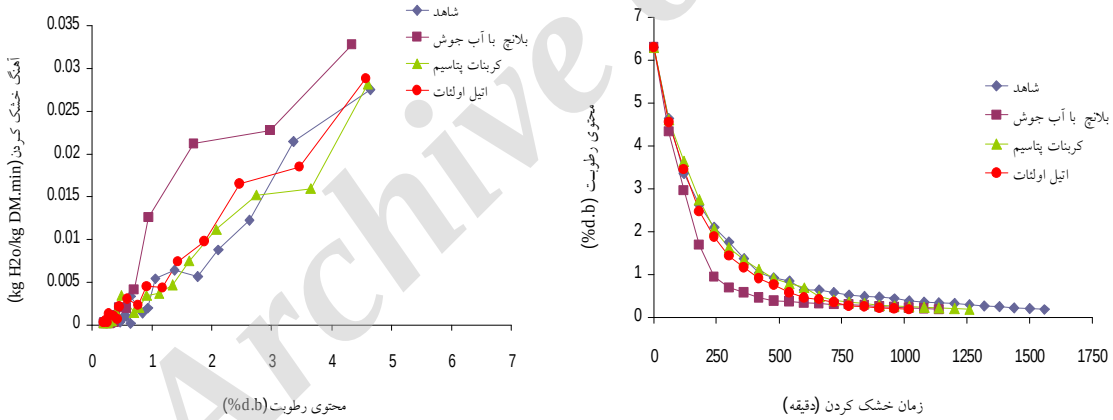
شکل 3- تغییرات محتوای رطوبت (راست) و آهنگ خشک کردن (چپ) نمونه‌های فلفل قرمز خشک شده در هوای داغ 65 درجه سانتی‌گراد همراه با پیش تیمارهای مختلف.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل 4-تغییرات محتوای رطوبت (راست) و آهنگ خشک کردن (چپ) نمونه‌های فلفل قرمز چیلی خشک شده در هوای داغ 75 درجه سانتی‌گراد همراه با پیش تیمارهای مختلف.



شکل 5- تغییرات محتوای رطوبت (راست) و آهنگ خشک کردن (چپ) نمونه‌های فلفل قرمز خشک شده به روش آفتابی همراه با پیش تیمارهای مختلف.

Archive of SID

www.SID.ir

بعد از فرآیند امتیازدهی تیمارها، شرایط بهینه خشک کردن فلفل قرمز چیلی شامل تیمارهایی است که از لحاظ تمامی شاخص‌های مورد بررسی بیشترین امتیاز لازم را کسب نماید. نتایج امتیازدهی تیمار نشان داد که در مجموع 68 امتیاز برای فرآیند خشک کردن فلفل قرمز بدست آمد که در بین پارامترهای مورد بررسی شاخص‌های سینتیکی زمان و آهنگ خشک کردن به ترتیب امتیازات 31 و 37 را به خود اختصاص دادند. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود از بین 16 تیمار مورد بررسی 4 تیمار با امتیازات مشابه (8 امتیازی) کلیه امتیازات و قیود مربوطه را کسب نمودند.

این تیمارها شامل تیمارهای (آنزیم‌بری با آب داغ و 65 درجه سانتی‌گراد)، (آنزیم‌بری با آب داغ و 75 درجه سانتی‌گراد)، (کربنات پتاسیم با 75 درجه سانتی‌گراد) و (اتیل اولئات و 75 درجه سانتی‌گراد) می‌باشند. با توجه به جدول (2)، بین تیمارهای فوق از لحاظ زمان و آهنگ خشک کردن هیچ اختلاف آماری معناداری مشاهده نگردید ($P<0/01$)، از طرف دیگر با توجه به اینکه در دمای کمتر خصوصیات تغذیه‌ای محصول تولیدی بهتر حفظ می‌گردد، بنابراین نمونه فلفل قرمز تیمار شده با آنزیم‌بری توسط آب داغ در دمای 65 درجه سانتی‌گراد، به عنوان بهترین تیمار انتخاب گردید.

جدول 2- اثر متقابل نوع پیش فرآیند و دمای هوای خشک کردن فلفل قرمز چیلی بر زمان خشک کردن

پیش فرآیند	دمای خشک کردن (^oC)	نماد	زمان خشک کردن (دقیقه)	آهنگ خشک کردن ($kg\ H_2O/kg\ DM.min$)
شاهد	55	B_{55}	135^{c}	$0/0230^{abcd}$
	65	B_{65}	105^{c}	$0/0295^{abcd}$
	75	B_{75}	$82/50^{c}$	$0/0464^{a}$
	آفتابی	B_S	780^{a}	$0/0039^{d}$
آنزیم‌بری با آب داغ	55	WB_{55}	$97/5^{c}$	$0/0319^{abc}$
	65	WB_{65}	$67/50^{c}$	$0/0461^{a}$
	75	WB_{75}	60^{c}	$0/0517^{a}$
	آفتابی	WB_S	570^{b}	$0/0054^{bcd}$
کربنات پتاسیم	55	K_{55}	105^{c}	$0/0295^{abcd}$
	65	K_{65}	$97/5^{c}$	$0/0318^{abc}$
	75	K_{75}	$67/50^{c}$	$0/0459^{a}$
	آفتابی	K_S	630^{ab}	$0/0049^{cd}$
اتیل اولئات	55	EO_{55}	$89/89^{c}$	$0/0344^{ab}$
	65	EO_{65}	$82/50^{c}$	$0/0376^{a}$
	75	EO_{75}	$67/50^{c}$	$0/0459^{a}$
	آفتابی	EO_S	510^{b}	$0/0060^{bcd}$

* در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک از لحاظ آماری اختلاف آماری معناداری ندارند ($P<0/01$).

Archive of SID

www.SID.ir

جدول 3-جمع بندی امتیازات حاصل از آزمایشات خشک کردن فلفل قرمز چیلی

تیمار	زمان (دقیقه)	آهنگ خشک کردن ($kgH_2O/kgDM\ min$)	جمع امتیازات
B_{55}	-	*	1
B_{65}	*	**	3
B_{75}	***	****	7
B_S	-	-	-
WB_{55}	**	***	5
WB_{65}	****	****	8
WB_{75}	****	****	8
WB_S	-	-	-
K_{55}	*	**	3
K_{65}	**	***	5
K_{75}	****	****	8
K_S	-	-	-
EO_{55}	***	***	6
EO_{65}	***	***	6
EO_{75}	****	****	8
EO_S	-	-	-
جمع امتیازات	31	37	68

****؛ بالاترین امتیاز، ***؛ امتیاز متوسط، **؛ امتیاز کم، *؛ امتیاز خیلی کم، بدون ستاره؛ مردود.

3-3- برازش منحنی‌های خشک کردن

بعد از فرآیند بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن فلفل قرمز و تعیین بهترین تیمار فرآیند خشک کردن، منحنی خشک کردن فلفل قرمز توسط هفت مدل تجربی خشک کردن لایه‌ای نازک مورد برازش قرار گرفت. پارامترهای آماری مورد آزمون شامل R^2، χ^2 و RMSE بودند. مقادیر آنالیز آماری برای هر یک از این پارامترها در جدول (4) به طور مختصر نمایش داده شده است. در کلیه حالات مقدار R^2 برای مدل‌های مورد برازش، بیشتر از 0/9690 محاسبه گردید. بازهٔ تغییرات R^2 بین 0/9690 تا 0/9981، χ^2 بین 0/000263 تا 0/004282 و دامنهٔ تغییرات RMSE نیز بین 0/013573 تا 0/054754 قرار داشت. نتایج برازش مدل‌های سینتیکی نشان داد که مدل لگاریتمی به دلیل بالاترین R^2 و کمترین χ^2 و RMSE به عنوان بهترین مدل در پیش‌بینی منحنی خشک کردن فلفل قرمز چیلی انتخاب شد. مقایسهٔ داده‌های نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده برای بهترین مدل برازش کننده منحنی خشک کردن فلفل قرمز چیلی در شکل (6) نمایش داده شده است. مقادیر نسبت رطوبت داده‌های پیش‌بینی شده بر حسب داده‌های تجربی به صورت یک خط راست روی نمودار بوده که خود گویای پیش‌بینی دقیق این مدل می‌باشد.

جدول (5) مقادیر ضرایب ثابت مدل‌ها برای فلفل قرمز چیلی پیش فرآیند شده با آنزیم‌بری آب جوش و خشک شده در دمای 65 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. منحنی تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان خشک کردن برای داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده در این حالت در شکل (7) نشان داده شده است.

Archive of SID

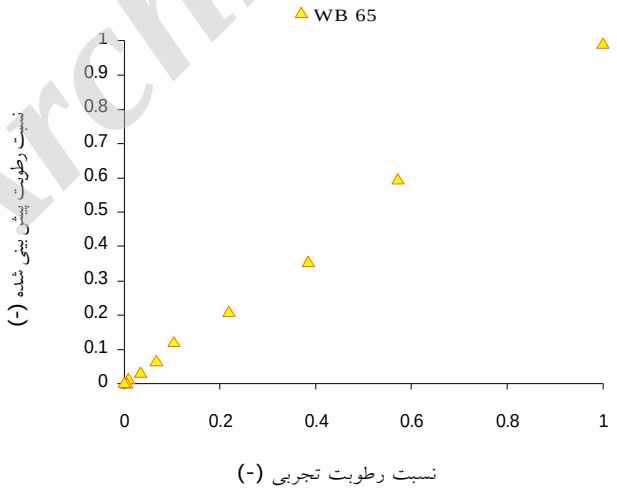
www.SID.ir

جدول 4- نتایج مدل‌های خشک کردن لایه نازک فلفل قرمز پیش فرآیند شده با آنزیم‌بری آب داغ و خشک شده در دمای 65 درجه سانتی‌گراد.

نام مدل	χ^2	RMSE	R^2
نیوتن	0/000279	0/015851	0/9974
پیج	0/000305	0/015645	0/9975
هندرسون و پابیس	0/000313	0/015844	0/9974
لگاریتمی	0/000263	0/013573	0/9981
تامسون	0/000736	0/024281	0/9941
سهمی‌وار	0/004282	0/054754	0/9690
دو جمله‌ای	0/000290	0/015237	0/9976

جدول 5- ضرایب ثابت مدل‌ها برای فلفل قرمز چیلی پیش فرآیند شده با آنزیم‌بری آب داغ و خشک شده در دمای 65 درجه سانتی‌گراد.

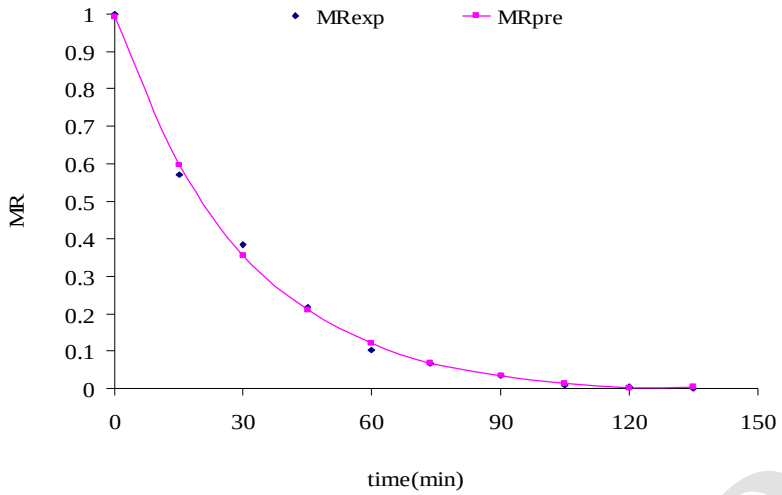
نام مدل	k (min^{-1})	n	a	b	c
نیوتن	0/034939	-	-	-	-
پیج	0/032471	1/0201	-	-	-
هندرسون و پابیس	0/034897	-	0/99865	-	-
لگاریتمی	0/033218	-	1/01008	-	-0/01612
تامسون	-	-	-0/02691	-0/000144	-
سهمی‌وار	-	-	0/90199	-0/018318	$8/95\times10^{-5}$
دو جمله‌ای	0/038497	-	1/36074	-	-



شکل 6- مقایسه‌ی نتایج نسبت رطوبت داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده فلفل قرمز طی پیش‌فرآیندهای مختلف خشک کردن.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل 7- منحنی تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان خشک کردن برای داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده برای فلفل قرمز پیش فرآیند شده با آنزیم‌بری آب جوش و دمای هوای 65 درجه سانتی‌گراد توسط مدل لگاریتمی.

4-نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

1- نتایج نشان داد که بکارگیری روش پیش فرآیند آنزیم‌بری با آب جوش و دمای هوای 75 درجه سانتی‌گراد، توانست آهنگ خشک کردن را به بیشینه مقدار خود برساند.

2- نمونه فلفل قرمز تیمار شده با (آنزیم‌بری با آب جوش و 65 درجه سانتی‌گراد) به عنوان بهترین تیمار جهت آبزدایی فلفل قرمز چیلی معرفی گردید. همچنین نتایج مدلسازی نشان داد که مدل لگاریتمی به عنوان بهترین مدل جهت پیش‌بینی منحنی خشک کردن فلفل قرمز چیلی انتخاب گردید.

5- منابع

1. توکلی پور، ح.، 1389. اصول خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی، ویرایش دوم، انتشارات آییژ.

2. مختاریان م. کوشکی، ف. 1391. کاربرد شبکه‌ی عصبی مصنوعی در پیش‌بینی نسبت رطوبت و بررسی خصوصیات حسی و تغذیه‌ای گوجه فرنگی در طی خشک کردن. *فصلنامه علوم و فناوری غذایی*. دانشگاه آزاداسلامی، واحد سبزوار، سال چهارم، شماره 13، صفحه 55.

3. Akintunde, T., 2010. Effect of pretreatment on drying time and quality of chilli pepper. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34: 595–608.

4. Akintunde, T., 2011. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. *Journal of Renewable Energy*, 36: 2139–2145.

5. AOAC, 1990. Official Method of Analysis.15th ed., vol.2. *Association of Official Analytical Chemists*, Inc., Arlington.

6. Ayub Hossain, M., Wood, J.L., KantiBala, B. 2007. Single-layer drying characteristics and colour kinetics of red chilli. *International Journal of Food Science and Technology*, 42, 1367–1375.

7. Doymaz, I. and Pala, M. 2000. A study on drying characteristics of Kahramanmaras red pepper. In Pre-prints of the Agricontrol 2000 – International Conference on Modelling and Control Agriculture, Horticulture and Post-harvested Processing, July 2000, Wageningen, the Netherlands.

8. Doymaz, I. and Pala, M. 2002. Hot-air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering* 55, 331–335.

9. 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.

10. Isiduro, E., Cotter, D.J., Fernandez, G.C.J. and Southward, G.M. 1995. Color retention in red chile powder as related to delayed harvest. *Journal of Food Science*. 60(5), 1075–1077.

11. Zhao, D., Zhao, C., Tao, H., An, K., Ding, S., Wang, Z. 2013. The effect of osmosis pretreatment on hot-air drying and microwave drying characteristics of chili (*Capsicum annuum L.*) flesh. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 1589–1595.

Archive of SID

www.SID.ir