

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

حمید توکلی پور<sup>1\*</sup>، محسن مختاریان<sup>2</sup>، لیلا زیرجانی<sup>3</sup>

<sup>1</sup>دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران

<sup>2</sup>باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران

<sup>3</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران

تاریخ پذیرش: 1393/2/26

تاریخ دریافت: 1392/4/31

## چکیده

هدف اصلی این تحقیق، بررسی تاثیر پارامترهای روش آبردایی و نوع پیش فرآیند، دمای و زمان خشک کردن بر روی فرآیند آبردایی فلفل قرمز چیلی می باشد. فرآیند آبردایی فلفل قرمز در دو روش هوای داغ (در سه دمای 55، 65 و 75 درجه سانتی گراد) 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 سانتی گراد، 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 سانتی گراد)، (اتیل اولئات و دمای هوای 75 درجه سانتی گراد) و (کربنات پتاسیم و دمای هوای 75 درجه سانتی گراد) مشاهده نگردید ( $p < 0/01$ ). بنابراین با توجه به اینکه در دمای کمتر خصوصیات تغذیه‌ای محصول تولیدی بهتر حفظ می گردد، بنابراین نمونه فلفل قرمز تیمار شده با (آنزیم‌بری با آب جوش و 65 درجه سانتی گراد) به عنوان بهترین تیمار معرفی گردید. نتایج مدلسازی نشان داد که مدل لگاریتمی به دلیل بالاترین  $R^2$  و کمترین  $\chi^2$  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.

## 1- مقدمه

لفل قرمز چیلی<sup>1</sup> 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 می‌شود 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<sup>2</sup> 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 (آکین تونده<sup>3</sup>، 2010).

لفل 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 (آکین تونده، 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 فرآوری مواد غذایی نمایان نموده است. پیش‌تیمارهای مختلفی به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنزیم‌بری کردن، آبگیری اسمزی و بکارگیری ترکیبات شیمیایی (پتاسیم متابی سولفات<sup>4</sup>، هیدروکسید پتاسیم و سدیم<sup>5</sup>، کربنات پتاسیم<sup>6</sup>، امولسیون‌های استر اتیل و متیل<sup>7</sup>، اسید سیتریک<sup>8</sup>، اسید آسکوربیک<sup>9</sup>) از جمله پیش‌تیمارهایی بوده که در صنعت خشکبار مورد استفاده قرار می‌گیرد (دویمز<sup>10</sup>، 2010). هدف از استفاده از محلول‌های پیش‌فرآیند، افزایش آهنگ خشک کردن

و تولید فرآورده‌ای با کیفیت مطلوب مناسب می‌باشد. بکارگیری پیش‌فرآیندهای 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<sup>11</sup> (2000) نشان داد که فلفل‌های پیش‌تیمار شده نسبت به انواع بدون پیش‌تیمار، سریع‌تر خشک شده و کیفیت رنگ بالاتری داشتند. آکین تونده (2010) تاثیر روش‌های خشک کردن و پیش‌تیمارهای مختلف را روی زمان خشک کردن و ویژگی‌های کیفی فلفل چیلی بررسی نمود. او انواع روش‌های آنزیم‌بری همراه با پیش‌فرآیند آبگیری اسمزی در غلظت‌های ساکارز 60 و 70 درجه بریکس را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که نمونه‌های فلفل پیش‌تیمار شده نسبت به نمونه‌های بدون پیش‌تیمار سریع‌تر خشک شدند. همچنین نمونه‌های خشک شده در روش آفتابی محتوای ارزش تغذیه‌ای بالاتری نسبت به سایر روش‌ها داشت. ژائو<sup>12</sup> و همکاران (2013) تاثیر پیش‌تیمار آبگیری را روی ویژگی‌های چیلی‌های خشک شده به روش هوای داغ و میکروویو مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های پیش‌فرآیند 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 میکروویو در توان 60 وات بعد از آبگیری اسمزی، محتوای ویتامین ث بالاتر و کیفیت رنگ بهتری داشت. ایوب حسین<sup>13</sup> 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 پیش‌فرآیند شده نسبت به انواع غیر پیش‌فرآیند، 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

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 پیچ 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

### 1-1- مواد

جهت انجام این پژوهش فلفل وارسته *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

#### 1-2-2- 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<sup>1</sup> (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<sup>2</sup> (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<sup>3</sup> (SC): فلفل‌ها در جهت طولی به تکه‌های 2/5 × 2/5 سانتی متر برش داده شد.
- نمونه شاهد<sup>4</sup> (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 15 دقیقه‌ای با استفاده از ترازوی دیجیتال 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 فرآیند 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

<sup>2</sup>- Chemical treatment (CT)

<sup>3</sup>- Slice (SC)

<sup>4</sup>- Blank (B)

<sup>1</sup> - Water blanching (WB)

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

نام مدل	معادله مدل
نیوتن <sup>2</sup>	$MR = \exp(-kt)$
پیچ <sup>3</sup>	$MR = \exp(-kt^n)$
هندرسون و پابیس <sup>4</sup>	$MR = a \exp(-kt)$
لگاریتمی <sup>5</sup>	$MR = a \exp(-kt) + C$
تامسون <sup>6</sup>	$t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2$
سهمی وار <sup>7</sup>	$MR = a + bt + ct^2$
دو جمله‌ای نمایی <sup>8</sup>	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$

در این تحقیق برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف کننده سینتیکی خشک کردن لایه‌ای نازک فلفل قرمز، ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>10</sup> (RMSE) و مربع کای ( $\chi^2$ )<sup>11</sup> 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.

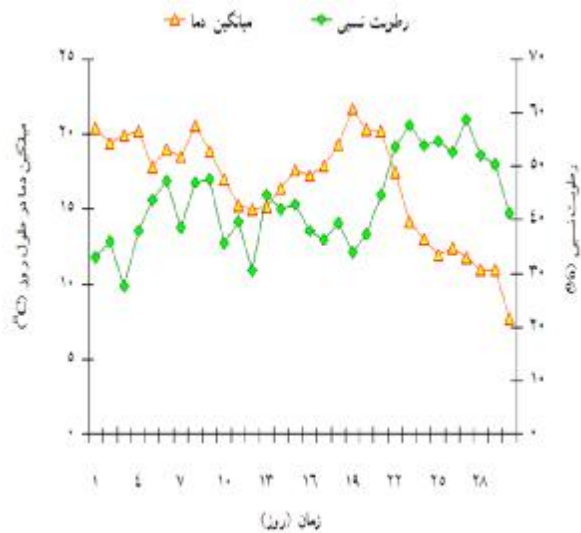
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR})^2} \quad (1)$$

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

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

در این معادلات  $MR_{exp,i}$  نسبت رطوبت فلفل قرمز مشاهده شده در آیین اندازه‌گیری،  $MR_{pre,i}$  نسبت رطوبت فلفل قرمز پیش‌بینی شده مدل در آیین 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  $\chi^2$  مورد ارزیابی قرار

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 سینتیکی خشک کردن

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

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

در این معادله  $X_t$  مقدار رطوبت در لحظه  $t$ ،  $X_0$  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<sup>1</sup> 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).

<sup>2</sup> - Newton

<sup>3</sup> - Page

<sup>4</sup> - Henderson & Pabis

<sup>5</sup> - Logarithmic

<sup>6</sup> - Thomson

<sup>7</sup> - Parabolic

<sup>8</sup> - Two-term exponential

<sup>9</sup> - Coefficient of determination ( $R^2$ )

<sup>10</sup> - Root mean square error (RMSE)

<sup>11</sup> - Chi-square ( $\chi^2$ )

<sup>1</sup> - Sigma Plot

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنادار<sup>1</sup> در جدول (2) نشان داده شده است. با توجه به جدول 2 مشخص می‌شود 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 پیش‌فرآیندهای مختلف نشان داد که نمونه پیش‌فرآیند شده در آنزیم‌بری با آب جوش زمان خشک کردن فلفل قرمز را در هر سه روش خشک کردن آفتابی<sup>2</sup>، خورشیدی<sup>3</sup> و هوای داغ<sup>4</sup> شتاب بخشید. به طور مشابه دویماز (2010) فرآیند خشک کردن سبب قرمز را در دو پیش‌فرآیند غوطه‌وری در اسید سیتریک و آنزیم‌بری با آب داغ مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که هر دو روش پیش‌فرآیند، زمان خشک کردن را نسبت به نمونه کنترل (شاهد) کوتاه نمود. به طوری که نتایج مذکور نشان داد که نمونه پیش‌فرآیند 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 قیدهای بالا، به تیمارهای مورد بررسی امتیاز داده شد و نتایج در جدول (3) ثبت گردید.

گرفت. در نهایت مدل یا مدل‌های خشک کردن با بیشینه ضریب تبیین  $R^2$  و کمینه پارامترهای RMSE و  $\chi^2$  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 پیش‌فرآیندهای 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 (AOAC، 1990). 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 پیش‌فرآیندهای 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).

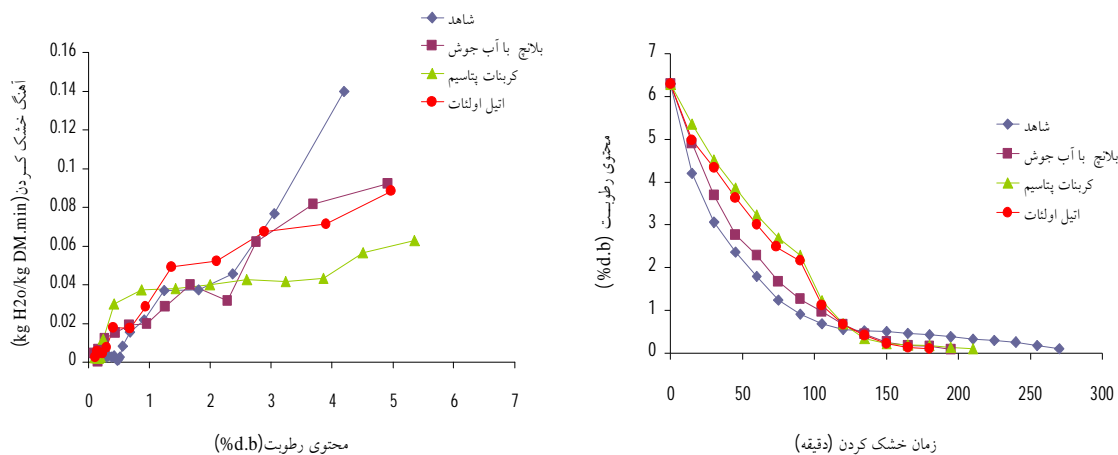
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل نوع پیش‌فرآیند و دمای هوای خشک کردن فلفل قرمز چیلی بر زمان و آهنگ خشک کردن در سطح احتمال 99% معنادار نگردید ( $P < 0/01$ ).

<sup>1</sup>- Least significant difference (LSD)

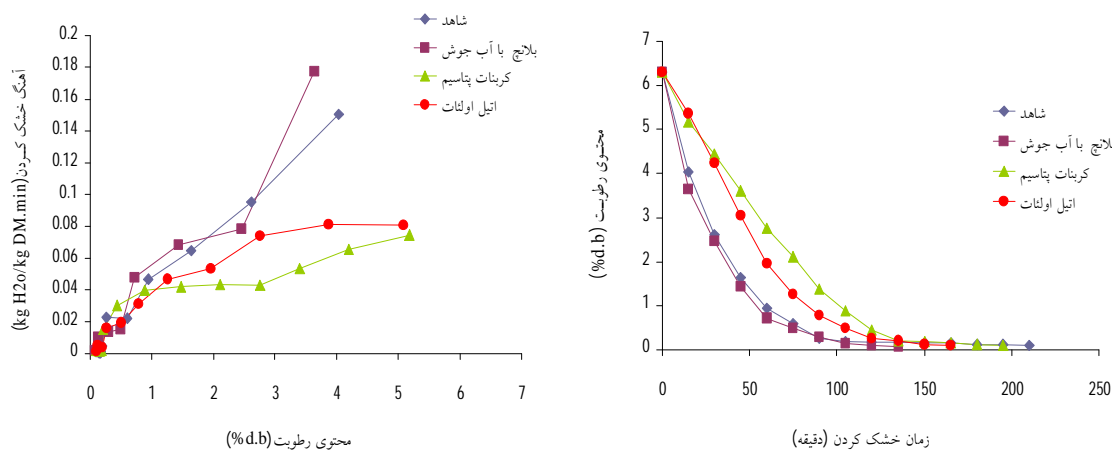
<sup>2</sup>- Sun drying

<sup>3</sup>- Solar drying

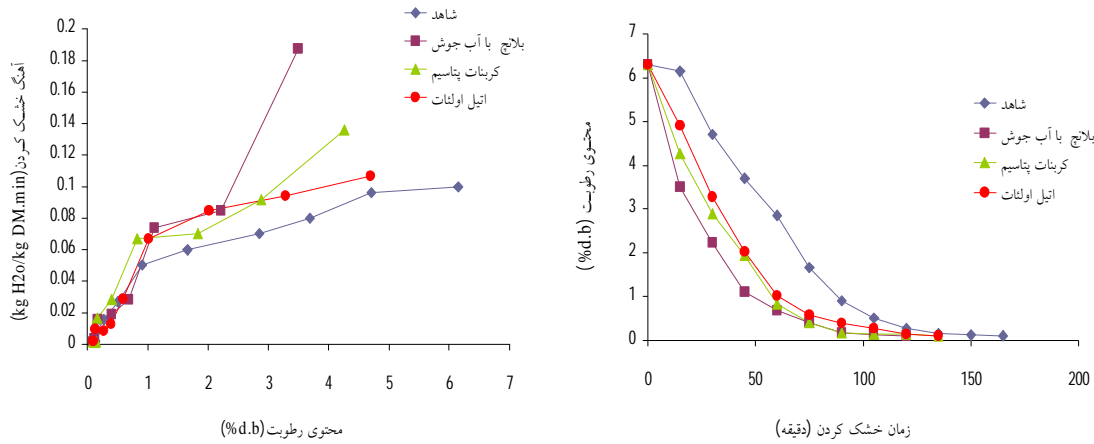
<sup>4</sup>- Hot air drying



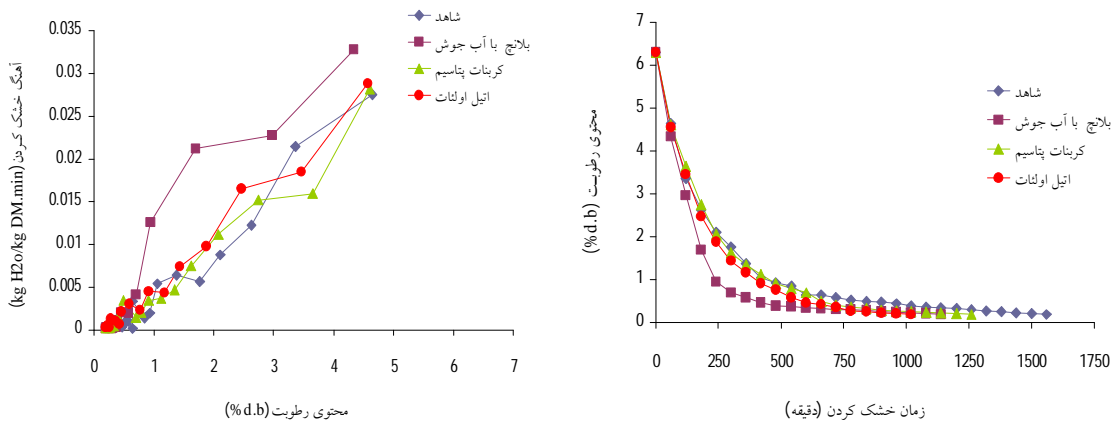
شکل 2- تغییرات محتوای رطوبت (راست) و آهنگ خشک کردن (چپ) نمونه‌های فلفل قرمز چیلی خشک شده در هوای داغ 55 درجه سانتی‌گراد همراه با پیش‌تیمارهای مختلف.



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



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 آفتاب‌پوش همراه با پیش تیمارهای مختلف.

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.

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.

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

پیش فرآیند	دمای خشک کردن (°C)	نماد	زمان خشک کردن (دقیقه)	آهنگ خشک کردن (kg H <sub>2</sub> O/kg DM.min)
شاهد	55	B <sub>55</sub>	135 <sup>c</sup>	0/0230 <sup>abcd</sup>
	65	B <sub>65</sub>	105 <sup>c</sup>	0/0295 <sup>abcd</sup>
	75	B <sub>75</sub>	82/50 <sup>c</sup>	0/0464 <sup>a</sup>
	آفتابی	B <sub>S</sub>	780 <sup>a</sup>	0/0039 <sup>d</sup>
آنزیم‌بری با آب داغ	55	WB <sub>55</sub>	97/5 <sup>c</sup>	0/0319 <sup>abc</sup>
	65	WB <sub>65</sub>	67/50 <sup>c</sup>	0/0461 <sup>a</sup>
	75	WB <sub>75</sub>	60 <sup>c</sup>	0/0517 <sup>a</sup>
	آفتابی	WB <sub>S</sub>	570 <sup>b</sup>	0/0054 <sup>abcd</sup>
کربنات پتاسیم	55	K <sub>55</sub>	105 <sup>c</sup>	0/0295 <sup>abcd</sup>
	65	K <sub>65</sub>	97/5 <sup>c</sup>	0/0318 <sup>abc</sup>
	75	K <sub>75</sub>	67/50 <sup>c</sup>	0/0459 <sup>a</sup>
	آفتابی	K <sub>S</sub>	630 <sup>ab</sup>	0/0049 <sup>cd</sup>
اتیل اولئات	55	EO <sub>55</sub>	89/89 <sup>c</sup>	0/0344 <sup>ab</sup>
	65	EO <sub>65</sub>	82/50 <sup>c</sup>	0/0376 <sup>a</sup>
	75	EO <sub>75</sub>	67/50 <sup>c</sup>	0/0459 <sup>a</sup>
	آفتابی	EO <sub>S</sub>	510 <sup>b</sup>	0/0060 <sup>abcd</sup>

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



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

تیمار	زمان (دقیقه)	آهنگ خشک کردن (kgH <sub>2</sub> O/kgDM min)	جمع امتیازات
B <sub>55</sub>	-	*	1
B <sub>65</sub>	*	**	3
B <sub>75</sub>	***	****	7
B <sub>S</sub>	-	-	-
WB <sub>55</sub>	**	***	5
WB <sub>65</sub>	****	****	8
WB <sub>75</sub>	****	****	8
WB <sub>S</sub>	-	-	-
K <sub>55</sub>	*	**	3
K <sub>65</sub>	**	***	5
K <sub>75</sub>	****	****	8
K <sub>S</sub>	-	-	-
EO <sub>55</sub>	***	***	6
EO <sub>65</sub>	***	***	6
EO <sub>75</sub>	****	****	8
EO <sub>S</sub>	-	-	-
جمع امتیازات	31	37	68

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

### 3-3-3- برازش منحنی های خشک کردن

منحنی خشک کردن فلفل قرمز چیلی در شکل (6) نمایش داده شده است. مقادیر نسبت رطوبت داده های پیش بینی شده بر حسب داده های تجربی به صورت یک خط راست روی نمودار بوده که خود گویای پیش بینی دقیق این مدل می باشد. جدول (5) مقادیر ضرایب ثابت مدل ها برای فلفل قرمز چیلی پیش فرآیند شده با آنزیم بری آب جوش و خشک شده در دمای 65 درجه سانتی گراد را نشان می دهد. منحنی تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان خشک کردن برای داده های تجربی و پیش بینی شده در این حالت در شکل (7) نشان داده شده است.

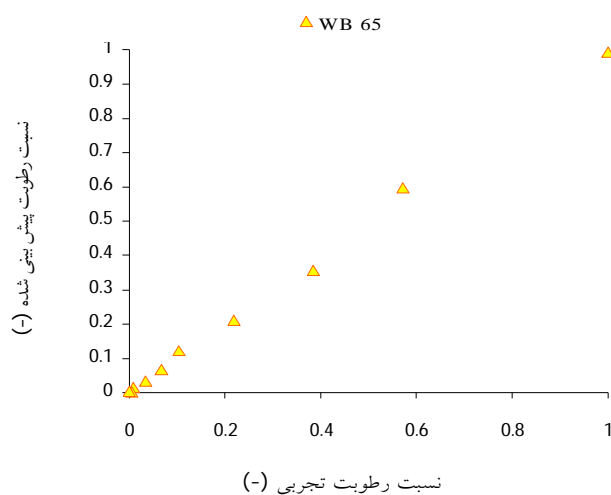
بعد از فرآیند بهینه سازی فرآیند خشک کردن فلفل قرمز و تعیین بهترین تیمار فرآیند خشک کردن، منحنی خشک کردن فلفل قرمز توسط مدل تجربی خشک کردن لایه ای نازک مورد برازش قرار گرفت. پارامترهای آماری مورد آزمون شامل  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE بودند. مقادیر آنالیز آماری برای هر یک از این پارامترها در جدول (4) به طور مختصر نمایش داده شده است. در کلیه حالات مقدار  $R^2$  برای مدل های مورد برازش، بیشتر از 0/9690 محاسبه گردید. بازه تغییرات  $R^2$  بین 0/9690 تا 0/9981،  $\chi^2$  بین 0/000263 تا 0/004282 و دامنه تغییرات RMSE نیز بین 0/013573 تا 0/054754 قرار داشت. نتایج برازش مدل های سینتیکی نشان داد که مدل لگاریتمی به دلیل بالاترین  $R^2$  و کمترین  $\chi^2$  و RMSE به عنوان بهترین مدل در پیش بینی منحنی خشک کردن فلفل قرمز چیلی انتخاب شد. مقایسه داده های نسبت رطوبت تجربی و پیش بینی شده برای بهترین مدل برازش کننده

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.

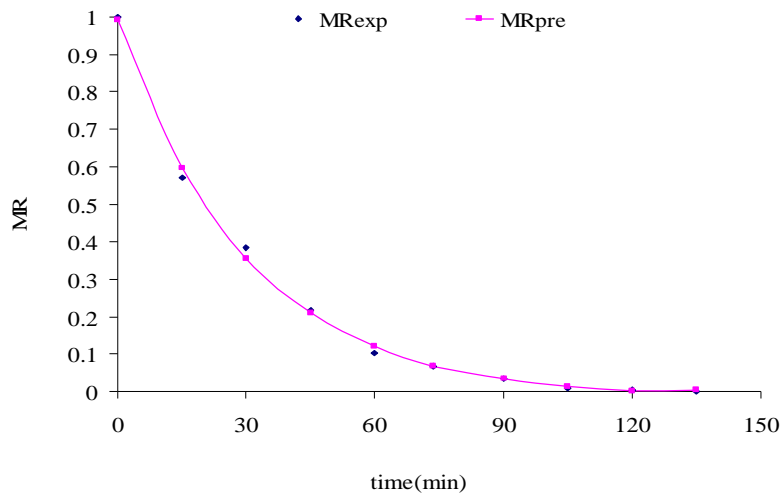
نام مدل	$\chi^2$	RMSE	$R^2$
نیوتن	0/000279	0/015851	0/9974
پیچ	0/000305	0/015645	0/9975
هندرسون و پابیس	0/000313	0/015844	0/9974
لگاریتمی	0/000263	0/013573	0/9981
تامسون	0/000736	0/024281	0/9941
سهمی‌وار	0/004282	0/054754	0/9690
دو جمله‌ای	0/000290	0/015237	0/9976

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 <sup>-1</sup> )	n	a	b	c
نیوتن	0/034939	-	-	-	-
پیچ	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	$8/95 \times 10^{-5}$
دو جمله‌ای	0/038497	-	1/36074	-	-



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



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. 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.

#### 4- نتیجه گیری

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 آبدایی 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 آبیژ.
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 آزاد اسلامی، 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.