



بهینه‌سازی شرایط خشک کردن فلفل قرمز در خشک‌کن سینی‌دار با جریان متقاطع هوا

زهرا هجری*

*گروه مهندسی شیمی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران،

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ‌های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۸

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

کلمات کلیدی:

فلفل قرمز،

خشک‌کن سینی‌دار،

درجه حرارت،

پانچ کردن،

سرعت هوا

در این پژوهش اثر دما، سرعت جابجایی هوا و پانچ کردن نیام‌ها بر فرایند خشک کردن فلفل قرمز در خشک‌کن سینی‌دار با جریان متقاطع هوا، مورد بررسی قرار گرفت. نمونه های فلفل قرمز در سه دمای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ °C، دو سرعت هوای ۱ و ۲ m/s و با سه روش آماده‌سازی پانچ نشده، پانچ شده توسط سوزن با قطر ۲ mm (سوزن شماره ۱) و پانچ شده توسط سوزن با قطر ۳/۵ mm (سوزن شماره ۲) خشک شده و شاخص‌های کیفی محصول نهایی شامل تندی، رنگ و رطوبت اندازه‌گیری گردیدند. با توجه به نتایج آزمایشات و تجزیه‌های آماری صورت گرفته، شرایط بهینه برای خشک کردن فلفل قرمز در خشک‌کن سینی‌دار با جریان متقاطع هوا، دمای ۷۵ °C، قطر پانچ ۲ mm، سرعت هوای ۱ m/s بود که سرعت خشک کردن در این شرایط ۰/۲۹۹ kg_w/kg_{dm}.h، میزان تندی ۰/۴۲۷ درصد جرمی کاپسائی سینوئیدهای تام و میزان رنگ استخراج‌شده بر اساس جذب نوری در طول موج ۴۵۸ نانومتر، ۳/۷۷۶ بود. همچنین نتایج نشان داد که مدل‌های غیرخطی پیچ و میدیلی با مقادیر بسیار پایین RMSE و χ^2 و ضریب تعیین بالا، برازش دقیق‌تری نسبت به مدل نیوتن ارائه کردند و بنابراین برای توصیف سینتیک خشک کردن فلفل قرمز مناسب‌تر هستند.

DOI: 10.48311/fsct.2026.118853.83028

* مسئول مکاتبات:

za.hejri@iau.ac.ir

۱-مقدمه

فلفل قرمز که از انواع کاسپیکوم ها می باشد، از جمله ادویه های پرمصرف در جهان است که به صورت تازه یا خشک شده مورد استفاده قرار می گیرد [۱، ۲]. معمولاً در منابع به دو گونه کاسپیکوم آنوئوم لینائوس^۱ (شامل واریته های دارای طعم ملایم) و کاسپیکوم فروتسنس لینائوس^۲ (شامل واریته های تند) بعنوان نام علمی این گیاه اشاره می گردد. عوامل تندی و رنگ در فلفل قرمز، کاپسای سیئوئیدها^۳ و کاروتنوئیدها هستند. فلفل ها بسته به نوع واریته، از لحاظ شکل، اندازه و رنگ، دارای تنوع زیادی می باشند. شکل نیام ها از گرد و کوتاه تا باریک و بلند متغیر است. هر نیام فلفل حاوی تعدادی از دانه های سفید متمایل به زرد مسطح، به قطر یک تا پنج میلی متر می باشد. تعداد، رنگ و اندازه دانه ها، بستگی به گونه فلفل دارد. در میوه تازه، دانه ها، به مغز میانی نیام که اسفنجی شکل است، توسط جفت انفرادی (دم دانه) چسبیده اند؛ ولی در میوه خشک شده، دانه ها غالباً از مغز نیام جدا شده و در فضای داخل نیام، بطور آزادانه حرکت می کنند. کاپسائی سیئوئیدها عامل اصلی ایجاد تندی در کاسپیکوم ها و وجه تمایز بین خانواده کاسپیکوم و سایر گروه های گیاهان بوده، مقدار و نوع آنها از یک گونه تا گونه دیگر بطور وسیعی تغییر می کند؛ به همین دلیل میزان و نوع تندی فلفل قرمزها بسیار متغیر بوده و از تندی خیلی ملایم تا تندی خیلی زیاد، متفاوت می باشند. در میان کاپسائی سیئوئیدها، دو ترکیب اصلی به نام های کاپسائی سین و دی هیدروکاپسائی سین، مجموعاً ۹۰-۸۰ درصد از میزان کل کاپسائی سیئوئیدهای فلفل قرمز را تشکیل داده و از این رو عامل ایجاد قسمت اعظم تندی در فلفل هستند. بخش عمده کاپسائی سیئوئیدها (حدود ۹۰٪) بر روی جفت یعنی محور اسفنجی سفید رنگی که در مرکز میوه بوده و تخم ها بر روی آن قرار دارند، متمرکز می باشند. دانه ها با اینکه منبع تندی نیستند، اما به لحاظ موقعیت خود در داخل نیام، مقادیری از کاپسائی سیئوئیدها را جذب می نمایند [۳]. تندی فلفل ها بر اساس سیستم واحد تندی اسکویل، تقسیم بندی می گردد.

بطورکل هر چقدر میوه فلفل، از لحاظ اندازه کوچکتر باشد، تندتر خواهد بود. فلفل ها در دسته غذاهای کم اسید قرار می گیرند و دارای pH بین ۴/۸ تا ۶/۰، بسته به واریته خود هستند. کاسپیکوم ها و بویژه کاسپیکوم آنوئوم، از لحاظ رنگدانه های کاروتنوئیدی غنی می باشند. قسمت عمده رنگ کاسپیکوم مربوط به کاروتنوئیدهای کاپسانتین و کاپسوروبین است. کاسپیکوم دارای ۱۷-۹ درصد چربی و ۱۵-۱۲ درصد پروتئین بوده و یک منبع سرشار از ویتامین های C و A می باشد. دانه های این میوه نیز حاوی ویتامین های B، A و C هستند. در فلفل های قرمز تند گونه کاسپیکوم فروتسنس، علاوه بر مواد فوق، سیتریک اسید، پالمیتیک اسید، پنتوزان و پکتین نیز یافت می شوند. روغن های فرار نیز که به مقادیر ناچیزی وجود دارند، مشتمل بر ۱۲۵ ترکیب مجزا هستند که تقریباً ۲۴ تا از آنها شناخته شده اند. Scopoletin، که یک کومارین می باشد نیز در این گیاه وجود دارد (کومارین ماده متبلور سفیدرنگی به فرمول $C_9H_6O_2$ می باشد که در جلوگیری از انعقاد خون مؤثر است) [۴].

فلفل قرمز با رطوبت بالا برداشت می شود و باید خشک شده تا رطوبت بسیار کمی داشته باشد (۸ تا ۱۰ درصد وزنی برای ذخیره سازی و ۴ تا ۵ درصد وزنی برای آسیاب کردن) [۵]. در اکثر مناطق تولید کننده فلفل قرمز، این محصول به روش سنتی در آفتاب خشک می شود. در روش سنتی فلفل قرمز پس از رسیدن برداشت و در فضای بسته (در اتاقک ها یا در کنار زمین ها و در زیر کاه یا روانداز) به مدت ۱ تا ۳ روز انباشته شده تا نیام ها از لحاظ رنگ یکنواخت گردند، سپس محصول بر روی پشت بام، دامنه کوه و یا کنار جاده ها و یا زمین های کشاورزی گسترانیده شده می شود. فلفل نیمه خشک شده، شب ها به صورت کومه در آمده و روی آنها پوشانیده؛ سپس طی روز گسترانیده می شوند. بدین ترتیب بسته به شرایط دما و رطوبت محیط، محصول طی ۱۵-۶ روز خشک می گردد. در برخی مناطق نیز محصول در تمام مدت خشک کردن، در

معرض هوا باقی می‌ماند. همچنین برخی، فلفل‌ها را در وزن‌های ۵-۱۲ کیلوگرم به صورت خوشه درآورده و از دیوار خانه‌ها و یا پایه‌هایی می‌آویزند؛ این روش ممکن است چندین هفته به طول بیانجامد. علاوه بر این، نیام‌ها به طور غیریکنواخت خشک شده و بخش‌های خارجی که بیشتر در معرض نور هستند بیرنگ شده و ممکن است دانه‌ها نیز از نیام‌های آسیب دیده بیرون بریزند. در این روش‌ها، محصول برای مدت طولانی با رطوبت نسبتاً بالا (که باعث ایجاد کپک در محصول می‌شود)، در فضای باز و روی سطوح غیر بهداشتی در معرض عوامل محیطی مختلف مثل گرد و غبار، بارش باران، حشرات، پرندگان و سایر حیوانات قرار گرفته و در نتیجه محصولی با کیفیت نامطلوب بدست خواهد آمد [۶-۸]. بنابراین به منظور کاهش زمان خشک کردن فلفل قرمز و نیز ارتقاء کیفی محصول، بکارگیری روش‌های پیشرفته تر و خشک‌کن‌های مکانیکی امری ضروری به نظر می‌رسد [۱، ۵، ۹، ۱۰].

در روش خشک کردن صنعتی، محصول پس از ورود به کارگاه‌های فرآوری، ابتدا مورد سورت و بازبینی قرار گرفته، با آب کلر شستشو و پس از عبور از دستگاه لرزاننده به منظور گرفتن آب اضافی و مواد خارجی و سپس سورت نهایی، وارد دستگاه برش دهنده، پانچر یا هر دستگاه دیگری که به منظور انجام عملیات آماده‌سازی قبل از خشک کردن بکار می‌رود، گردیده و سپس داخل خشک‌کن قرار گرفته و تا رسیدن به رطوبت نهایی، خشک می‌شود. از مزایای خشک کردن به روش صنعتی، کیفیت بهتر محصول، زمان کمتر و بازده بیشتر محصول می‌باشند. تحقیقات متعددی در زمینه خشک کردن فلفل قرمز صورت پذیرفته است.

پینار و همکاران، اثر روش‌های مختلف خشک کردن (آفتاب، سایه، گلخانه، مایکروویو (۳۰۰ تا ۶۰۰ وات)، همرفتی هوا ($60-80^{\circ}\text{C}$) و خشک کردن انجمادی) را بر سینتیک خشک کردن، ویژگی‌های بیوشیمیایی، نسبت آبگیری مجدد، رنگ و فنول تام فلفل مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. وانگ و همکاران، یک فناوری پیش تیمار حرارتی جدید به نام بلانچینگ برخورد با هوای داغ با رطوبت بالا (HHAIB)^۱ را برای فلفل قرمز مورد استفاده قرار داده و تأثیر آن بر رفتار

خشک شدن و مکانیسم‌های مربوطه را از طریق تجزیه و تحلیل فراساختار، محتویات و ترکیب مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج بدست آمده، HHAIB یک فناوری جایگزین امیدوارکننده بجای روش غوطه‌وری شیمیایی بوده و به طور گسترده‌ای فرآیند خشک شدن فلفل قرمز را بهبود می‌بخشد [۱۰]. در مطالعه دیگری نیز، خشک کردن فلفل چیلی با چهار روش خشک کردن همرفتی، همرفتی-مایکروویو، خشک کردن خلأ و خشک کردن انجمادی بررسی گردید؛ نتایج نشان داد مدل Midilli بهترین توصیف‌کننده سینتیک فرآیند است. روش خشک کردن انجمادی در دمای ۴۰ درجه بیشترین حفظ رنگ، کاروتنوئید، کاپسایین سینوئید و پلی فنول را داشت، در حالی که روش خشک کردن همرفتی-مایکروویو در دمای ۶۰ درجه بیشترین افت کیفیت را نشان داد. به طور کلی، افزایش دما موجب کاهش فلاونوئید کل شد و روش‌های خشک کردن انجمادی و خشک کردن خلأ بهترین کیفیت محصول خشک شده را فراهم کردند [۱۲].

هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر شرایط دما، سرعت هوا و روش آماده سازی در فرایند خشک کردن به روش مکانیکی، بر محتوای رطوبت محصول نهایی، سرعت خشک کردن و ویژگی‌های کیفی فلفل قرمز بویژه تندی و رنگ می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد

فلفل قرمز تازه، از بخش داورزن سبزوار در استان خراسان تهیه گردید. در آزمایشات انجام شده، از واریته‌ای از فلفل قرمز استفاده شد که چیلی قرمز نیز نامیده شده و در تهیه پودر فلفل قرمز مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت انجام آزمایشات کیفی فلفل قرمز خشک شده از استن، کلروفورم، متانول، کلریدریک اسید، سدیم هیدروکسید، دی‌اتیل‌اتر، اتیل استات ساخت شرکت مرک آلمان و نیز آب مقطر کانی‌زدایی شده استفاده گردید.



Figure 1. Red pepper (*Capsicum annuum L.*) used in the experiment

دانه‌ها به خارج از نیام و در نتیجه کاهش افت های کمی و کیفی در محصول می‌باشد. بنابراین اندازه قطر سوزن پانچر نیز بعنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر فرایند خشک کردن فلفل قرمز، در نظر گرفته شده و فلفل‌ها در دو حالت پانچ شده و پانچ نشده، با شرایط دمایی و سرعت هوای مورد نظر، خشک شدند.

۲-۳ روش خشک کردن

برای آزمایشات خشک کردن، از دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی از نوع سینی‌دار با جریان متقاطع هوا استفاده گردید. این خشک‌کن ها شامل چهار واحد کاملاً یکسان و مستقل از یکدیگر و مجهز به سیستم کنترل کامپیوتری می‌باشند (شکل ۲).

۲-۲ روش آماده‌سازی نمونه

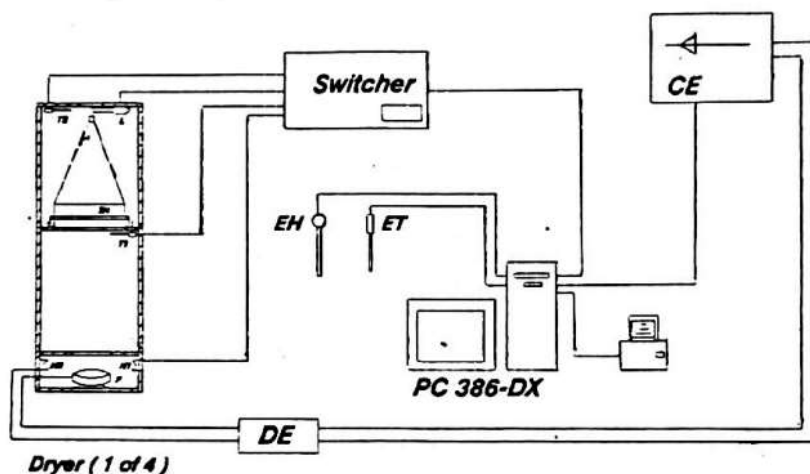
فلفل قرمز تازه به صورت تصادفی و از یک کرت، به شیوه مناسب برداشت و پس از بسته بندی در کارتن به آزمایشگاه انتقال داده شد. نمونه ها پس از بازبینی و سورت، در وزن‌های ۲-۳ کیلوگرم، در پارچه‌های نخی پیچیده شده و در یخچال با دمای $5-4^{\circ}\text{C}$ نگهداری شدند. پیش از انجام هر مرحله آزمایش، میزان رطوبت اولیه نمونه ها تعیین گردید. با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه شیوه‌های مختلف خشک کردن فلفل قرمز، به منظور تسریع فرایند خشک کردن، از پانچ (سوراخ) کردن نیام‌ها، استفاده شد. برتری این روش نسبت به سایر روش‌ها (مانند ایجاد خراش بر روی سطح نیام و برش دادن)، تأثیر کمتر بر روی اسانس ها و مواد فرار میوه و نیز جلوگیری از ریختن



Figure 2. Four laboratory tray-type cross-flow air dryers

بوسیله بازوهای به سیستم حامل متصل می‌گردد. در قسمت پائین و بالای سینی خشک‌کن دو سنسور دمایی تعبیه شده که درجه حرارت هوا را قبل و بعد از تماس با محصول روی سینی، با دقت $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ثبت می‌نماید و به فاصله 40 mm بالاتر از سینی، دریچه‌ای تعبیه شده که هوای مرطوب از طریق آن خارج می‌گردد تا رطوبت نسبی داخل خشک‌کن بالا نرود. سطح زیرین سیستم حامل مشبک بوده (مش 4 mm) و عبور هوای گرم را از بستر ماده تحت فرایند، امکان پذیر می‌سازد. هوادهی اجباری در داخل سیستم، توسط فن‌هایی کاملاً یکسان که در هر یک از خشک‌کن‌ها تعبیه گردیده‌اند، ایجاد می‌شود. سنجش رطوبت نسبی هوا در محیط اطراف خشک‌کن‌ها، بوسیله یک رطوبت سنج دیجیتالی با دقت $\pm 1\%$ صورت گرفت.

هر سیستم از سه بخش اصلی تشکیل گردیده است. در بخش پائین، سیستم‌های حرارتی و فن دمنده قرار گرفته‌اند. در سطح زیرین آن، دریچه‌ای برای ورود هوا، تعبیه شده است. جریان هوا در هر دستگاه از طریق این دریچه و توسط یک فن از نوع توربینی که در زیر المنت‌ها قرار گرفته و حول محور عمودی دوران می‌کند، به داخل مکیده می‌شود. قبل از روشن کردن المنت‌های برقی، سرعت هوا توسط یک سرعت‌سنج (انومتر مارک لوترون، مدل AM-4201)، با دقت $\pm 0.1\text{ m/s}$ اندازه‌گیری می‌شود. جریان هوای مکیده شده، پس از عبور از روی سیستم‌های حرارتی، به بخش میانی وارد می‌گردد. در طول آزمایش، درجه حرارت هوای درون سیستم توسط نرم افزار کنترل، در مقدار مورد نظر، ثابت نگه داشته می‌شود. مرز بین بخش میانی و فوقانی را سطح سیستم حامل تشکیل می‌دهد. در بالای این قسمت، سیستم توزین تعبیه شده که



- ET: سنسور اندازه‌گیری دمای هوای محیط اطراف سیستم خشک‌کن
 CE: سیستم کنترل الکترونیک
 T₁: سنسور درجه حرارت هوا، قبل از سیستم حامل
 T₂: سنسور درجه حرارت هوا، بعد از سیستم حامل
 DE: سیستم الکترونیکی خشک‌کن
 SH: سیستم حامل نمونه
 H₁: منبع حرارتی دستی
 H₂: منبع حرارتی اتوماتیک
 L: لودسل
 F: فن
 EH: سنسور اندازه‌گیری رطوبت محیط

Figure 3. Schematic diagram of a laboratory drying system with an electronic control system

می‌گیرد. وزن‌های یکسان از نمونه‌های آماده شده به صورت یکنواخت و تک‌لایه بر روی سینی‌ها گسترانیده شده و داخل خشک‌کن‌ها قرار گرفته و پس از رسیدن به رطوبت مورد نظر و ثبت شرایط، از دستگاه خارج می‌گردیدند. نمونه‌های خشک شده، پس از رسیدن به دمای محیط، با دستگاه آسیاب

با توجه به هوادهی نمونه در طول فرایند و خطای ناشی از آن در سنجش وزن، نرم افزار کنترل در هنگام ثبت داده‌ها، فن‌ها را خاموش و پس از مکثی کوتاه (۲۰ دقیقه) و قطع کامل جریان هوا در داخل سیستم، توزین با دقت سنجش $\pm 0.01\text{ g}$ انجام

خشک کن»، «سرعت جریان هوا درون خشک کن» و «قطر پانچ کننده نیام ها» بودند. درجدول (۱) فاکتورها به همراه سطوح آنها مشخص شده‌اند. ۱۹ تیمار بدست آمده در سه تکرار بررسی شدند. آنالیز آماری برروی نتایج حاصل از انجام آزمایشات، طبق روش آنالیز واریانس (ANOVA)، توسط نرم افزار آماری Design Expert Ver. 13 صورت گرفت.

Table 1. Factors used in the experiments along with their corresponding levels

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A: Air velocity (m/s)	1	2	—
B: Puncher diameter (mm)	۰	2	3.5
C: Drying temperature (°C)	55	65	75

المللی ISO شماره ۷۵۴۳-۱ به روش اسپکتروفتومتری تعیین گردید. این روش نیاز به رنگبری باکربن فعال دارد. گاهی در شرایط آزمایش محلول کاپسای سیئوئید استخراج شده به اندازه کافی بی‌رنگ نمی‌شود؛ دراینصورت لازم است که تعیین مقدار کاپسای سیئوئیدها به روش کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا انجام گیرد. در آزمون‌های انجام شده، محلول‌ها به اندازه کافی بی‌رنگ شدند. لذا نیازی به استفاده از HPLC وجود نداشت. این روش بر اساس استخراج عصاره پودر فلفل قرمز خشک شده بوسیله تتراهیدرفوران و سپس اندازه گیری جذب محلول متانولی عصاره ها در طول موج‌های ۲۴۸ و ۲۹۶ نانومتر صورت می‌پذیرد. مقدار درصد جرمی کاپسائی سیئوئیدهای تام در طول موج ۲۴۸ نانومتر (W_{248}) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$W_{248} = \frac{(A_s - A_b) \times d}{314 \times m}$$

درصد جرمی مقدار کاپسائی سیئوئیدهای تام در طول موج ۲۹۶ نانومتر نیز از طریق رابطه زیر بدست می‌آید [۱۳]:

$$W_{296} = \frac{(A_s - A_b) \times d}{127 \times m}$$

آزمایشگاهی سائیده شده و سپس به منظور جلوگیری از جذب رطوبت در پاکت‌های مخصوص از جنس سلوفان، بسته بندی گردیده، درب بسته ها با دستگاه دوخت پلاستیک بسته شد.

۴-۲ طراحی آماری آزمایشات

آزمایش‌های خشک کردن با استفاده از طرح فاکتوریل بهینه (D-Optimal) طراحی و انجام شدند. فاکتورهای بکار رفته در آزمایشات خشک کردن عبارت از «درجه حرارت هوای درون

۵-۲ سنجش رطوبت

براساس استاندارد ملی ایران - شماره ۱۱۹۶، میزان رطوبت فلفل قرمز از طریق خشک کردن ۵-۱۰ گرم نمونه در آون اتمسفریک در دمای ۱۰۵-۱۰۰ °C تا رسیدن به وزن ثابت، تعیین گردید. درصد رطوبت نمونه، از طریق رابطه زیر محاسبه شد:

درصد رطوبت بر مبنای مرطوب

$$= \frac{(M_1 - M_2)}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه:

M_0 : وزن نمونه مرطوب

M_1 : وزن ظرف و نمونه قبل از خشک کردن

M_2 : وزن ظرف و نمونه بعد از خشک کردن

(2)

۶-۲ آزمون سنجش میزان تندی فلفل قرمز

میزان تندی فلفل‌های قرمز، نقش مهمی در مقدار و نحوه مصرف آنها دارد. جهت اندازه گیری میزان تندی نمونه های خشک شده، مقدار کاپسای سیئوئید تام، طبق استاندارد بین (3)

که در آن :

A_s : جذب محلول نمونه

A_b : جذب محلول شاهد

d : ضریب رقت که در شرایط مذکور در

استاندارد برابر است با 100×25

m : جرم نمونه به گرم

۷-۲ روش سنجش رنگ

جهت اندازه‌گیری میزان رنگ نمونه‌های خشک شده فلفل قرمز، براساس استاندارد ISI شماره ۹۳۴۵، از استخراج توسط استون (با استفاده از دستگاه سوکسله) و سپس اندازه‌گیری میزان رنگ قابل استخراج به روش اسپکتروفتومتری (در طول موج ۴۵۸ نانومتر)، استفاده گردید. این روش که بر مبنای اندازه‌گیری رنگ ناشی از ترکیبات شیمیایی (نه صرفاً ظاهر) می‌باشد، برای بررسی کیفیت ادویه‌ها و محصولات خشک‌شده اهمیت دارد.

(9)

۸-۲ بررسی سینتیک خشک کردن

برای ارزیابی رفتار خشک‌کردن فلفل قرمز (10) مدل ریاضی پرکاربرد شامل نیوتن^۱، پیچ^۲ و میدیلی^۳ انتخاب شدند. به این منظور، رطوبت نمونه‌ها بر مبنای خشک (d.b.) در طول زمان تعیین شد. نسبت رطوبت (MR) بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه گردید:

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4)$$

که در آن $M(t)$ رطوبت در زمان t ، M_0 رطوبت اولیه و M_e رطوبت تعادلی است.

• مدل نیوتن

$$MR = \exp(-kt) \quad (5)$$

• مدل پیچ

• مدل میدیلی

(6)

$$MR = \exp(-kt^n)$$

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (7)$$

a ، b ، k و n : پارامترهای مدل‌ها می‌باشند.

برای سنجش دقت مدل‌ها، سه شاخص آماری محاسبه گردید؛ برازش پارامترها با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی در نرم‌افزار Excel Solver انجام شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (MR_{exp} - MR_{pred})^2}{\sum (MR_{exp} - \bar{MR}_{exp})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (MR_{exp} - MR_{pred})^2}{N}}$$

$$x^2 = \frac{\sum (MR_{exp} - MR_{pred})^2}{N - p}$$

۳- نتایج و بحث

در بررسی پارامترهای مؤثر بر فرایند خشک کردن، تأثیر دمای هوای درون خشک‌کن، سرعت جریان هوا درون خشک‌کن و قطر پانچ کننده نیام‌ها و نیز اثرات متقابل آنها بر روی زمان خشک کردن و سرعت خشک کردن، تندی، رنگ و رطوبت مورد بررسی قرار گرفتند.

۱-۳ زمان و سرعت خشک کردن

خشک کردن فرایندی است که در آن فعالیت آبی یک ماده غذایی از طریق حذف بخش اعظم آب موجود در آن توسط تبخیر، تصعید یا یک فرایند مکانیکی، کاهش می‌یابد. در اثر کاهش مقدار رطوبت ماده غذایی، از فساد میکروبی جلوگیری می‌شود و سرعت دیگر واکنش‌های نامطلوب نیز کاهش می‌یابد.

³ . Midilli

نمودار رطوبت آزاد بر حسب زمان خشک شدن بدست آیند. با مشتق‌گیری از این منحنی نسبت به زمان، منحنی سرعت خشک کردن بدست می‌آید [۱۴].

در جدول (۲)، زمان و سرعت خشک کردن لازم برای دستیابی به رطوبت نهایی (۸-۱۰٪) در تیمارهای مورد بررسی، مشاهده می‌گردد (رطوبت اولیه به طور متوسط ۸۳/۴ درصد، در مبنای مرطوب بوده است).

خشک کردن ضمن اعمال اثر حفاظتی بر روی محصول، وزن و حجم و در نتیجه هزینه‌های حمل و نقل و ذخیره‌سازی را نیز به مقدار قابل توجهی تقلیل می‌دهد. از آنجا که فرایند خشک کردن، عطر، طعم و ارزش غذایی مواد را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا کاهش رطوبت باید به گونه‌ای انجام شود که کمترین تأثیر را بر روی کیفیت آن داشته باشد. برای انتخاب شرایط مناسب خشک کردن، لازم است سرعت خشک کردن ماده غذایی بررسی شود؛ این داده‌ها در مورد تمام مواد غذایی، در دسترس نبوده و باید از طریق آزمایشات تجربی و رسم

Table 2. Drying time and rate to achieve final moisture content in the product

Temperature (°C)	Air velocity (m/s)	Unpunched		Punched with needle 1		Punched with needle 2	
		Drying time (h)	Average drying rate (kg _w /kg _{dm} .h)	Drying time (h)	Average drying rate (kg _w /kg _{dm} .h)	Drying time (h)	Average drying rate (kg _w /kg _{dm} .h)
55	1	23.625	0.1935	22.375	0.2150	15.625	0.3065
55	2	23.125	0.1995	21.875	0.2190	15.500	0.3095
65	1	18.625	0.2450	15.500	0.3035	15.125	0.3810
65	2	17.625	0.2575	15.125	0.3130	12.500	0.3880
75	1	14.875	0.2975	13.875	0.3485	11.000	0.4225
75	2	15.375	0.2990	14.500	0.3315	10.875	0.4295

در شکل (۴)، در یک دما و سرعت جابجایی هوای معین (۶۵°C و ۱ m/s)، میزان رطوبت فلفل قرمزهایی که با چهار اندازه مختلف قطر سوزن پانچر (۱/۵، ۲، ۳، ۳/۵ میلی‌متر) پانچ و سپس خشک شده اند، بر حسب زمان رسم گردیده است. چنانکه در این نمودار مشاهده می‌گردد با افزایش قطر سوزن پانچ‌کننده، میزان رطوبت محصول سریع‌تر به مقدار نهایی خود نزدیک می‌شود. این امر بدلیل تبخیر راحت‌تر و سریع‌تر رطوبت از منافذ بزرگتر است. با توجه به نزدیک بودن زمان خشک کردن در اندازه منافذ ۱/۵ و ۲ و نیز ۳ و ۳/۵ به یکدیگر، اندازه‌های ۲ (سوزن ۱) و ۳/۵ (سوزن ۲) برای انجام آزمایشات در نظر گرفته شدند.

چنانکه مشاهده می‌گردد، در تیمار با شرایط دمای ۷۵°C، سرعت هوای ۲ m/s و پانچ شده توسط سوزن با قطر mm ۳/۵، کمترین زمان و بیشترین سرعت خشک کردن و در تیمار با دمای ۵۵°C، سرعت هوای ۱ m/s و پانچ نشده، بیشترین زمان و کمترین سرعت برای خشک کردن فلفل قرمز را داریم. لذا افزایش دما، سرعت هوا و قطر سوزن پانچ کننده، ۵۳/۹۷٪ کاهش زمان و ۱۲۲ درصد افزایش سرعت خشک کردن را به دنبال خواهد داشت. منحنی‌های رطوبت آزاد بر حسب زمان خشک شدن و سرعت خشک کردن در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳-۱-۱ اثر پانچ کردن

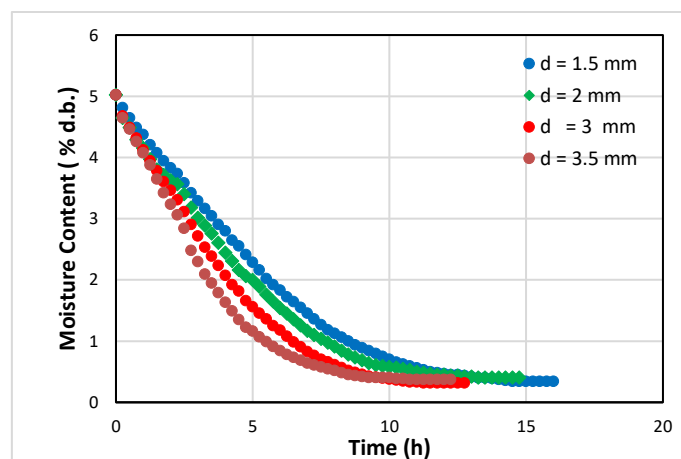


Figure 4. Drying curve of punched red peppers with four different punching needle diameters

مشاهده می‌گردد، عملیات پانچ کردن، زمان خشک کردن را کاهش می‌دهد. شیب منحنی خشک کردن برای نیم‌های پانچ نشده کمتر از حالت پانچ شده بوده و حالت‌های پانچ شده با سوزن‌های شماره ۱ و ۲ در مراتب بعدی قرار دارند.

در شکل‌های (۵) تا (۷) اثر پانچ کردن بر روند خشک شدن نیم‌های فلفل قرمز در دمای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ °C، با سرعت جابجایی هوای ۱ و ۲ m/s نشان داده شده است؛ چنانکه

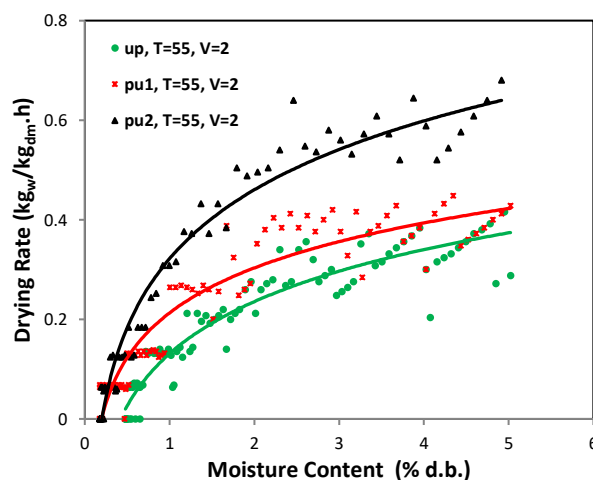
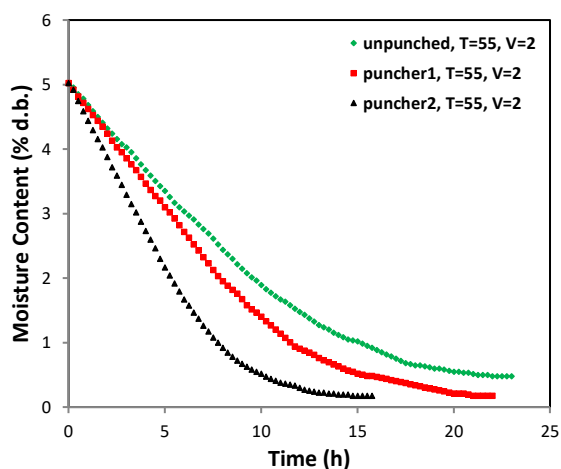
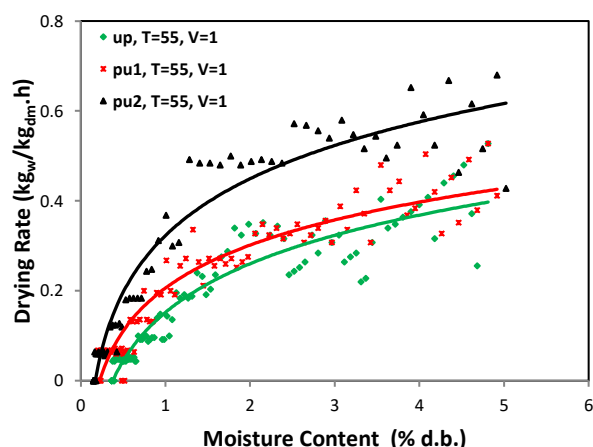
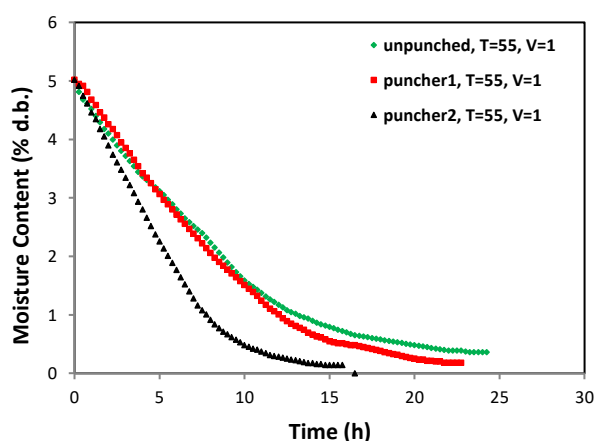


Figure 5. Effect of punching on moisture content and drying rate at 55°C and 1 m/s (top row), 2 m/s (bottom row)

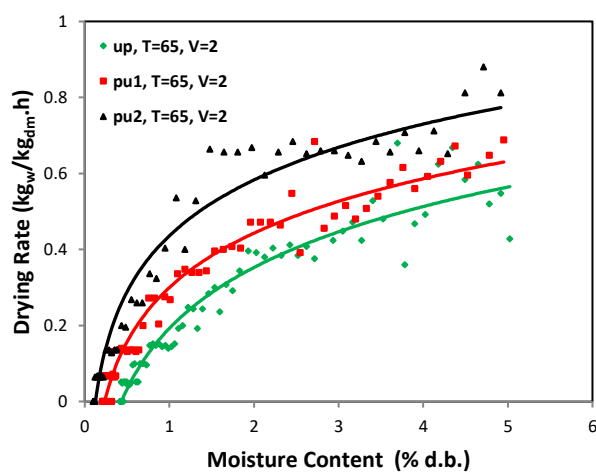
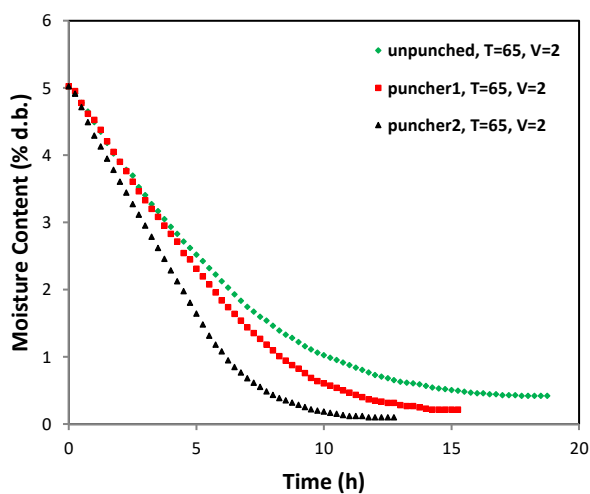
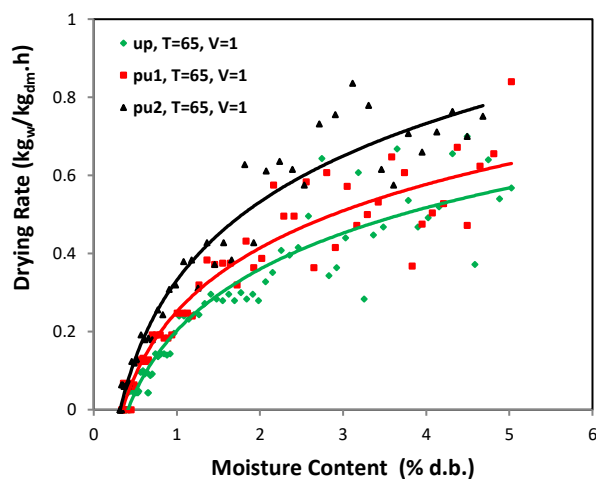
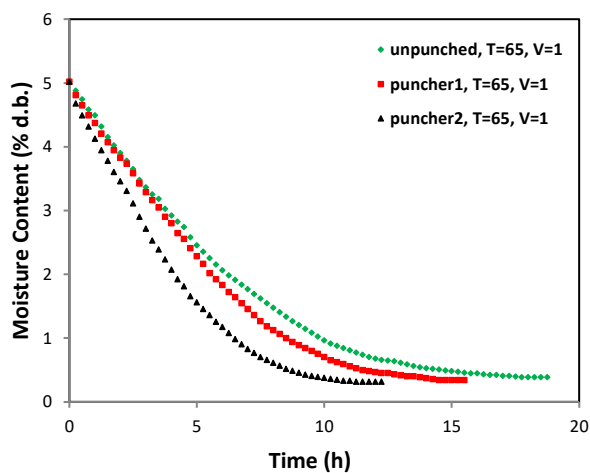
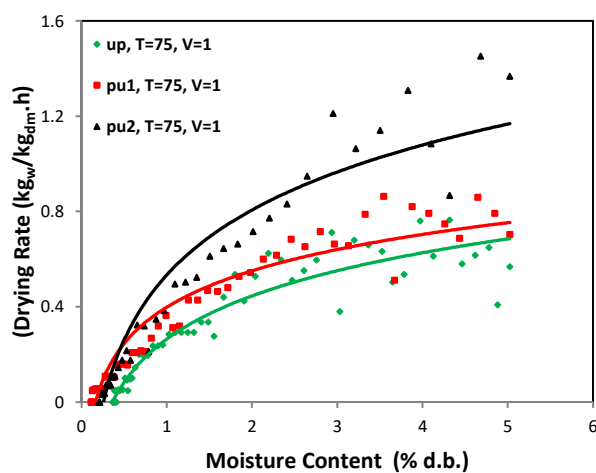
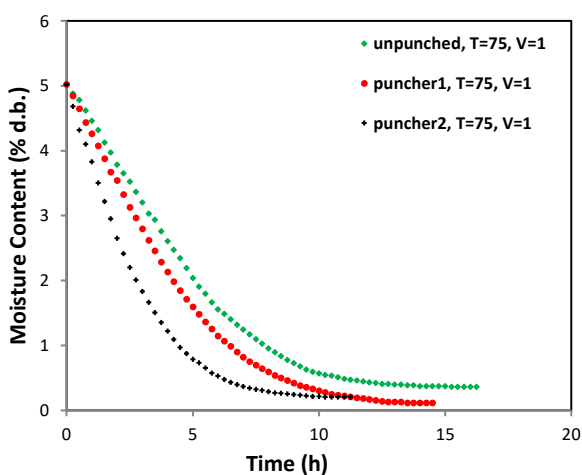


Figure 6. Effect of punching on moisture content and drying rate at 65°C and 1 m/s (top row), 2 m/s (bottom row)



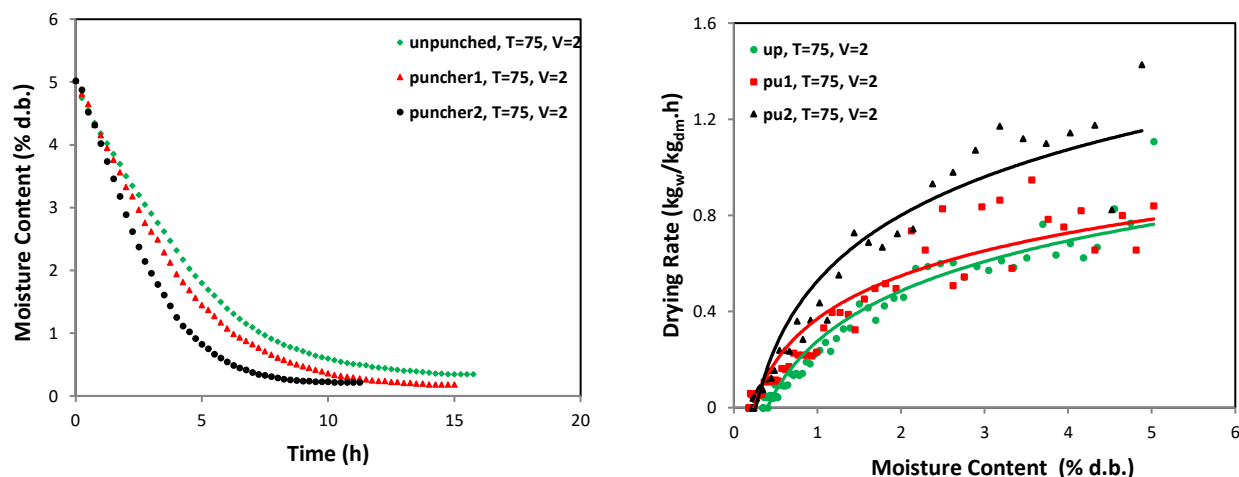


Figure 7. Effect of punching on moisture content and drying rate at 75°C and 1 m/s (top row), 2 m/s (bottom row)

خشک کردن کاهش می‌یابد. این امر بدلیل تبخیر سریع‌تر رطوبت در دماهای بالاتر است. هر سه دما دارای اختلاف معنی داری با یکدیگر بودند.

۳-۲ اثر درجه حرارت هوای درون خشک‌کن

مقایسه تأثیر دما از طریق ترسیم نمودار (شکل های ۸ تا ۱۰) و نیز مقایسه میانگین ها صورت پذیرفت. با افزایش دما، زمان

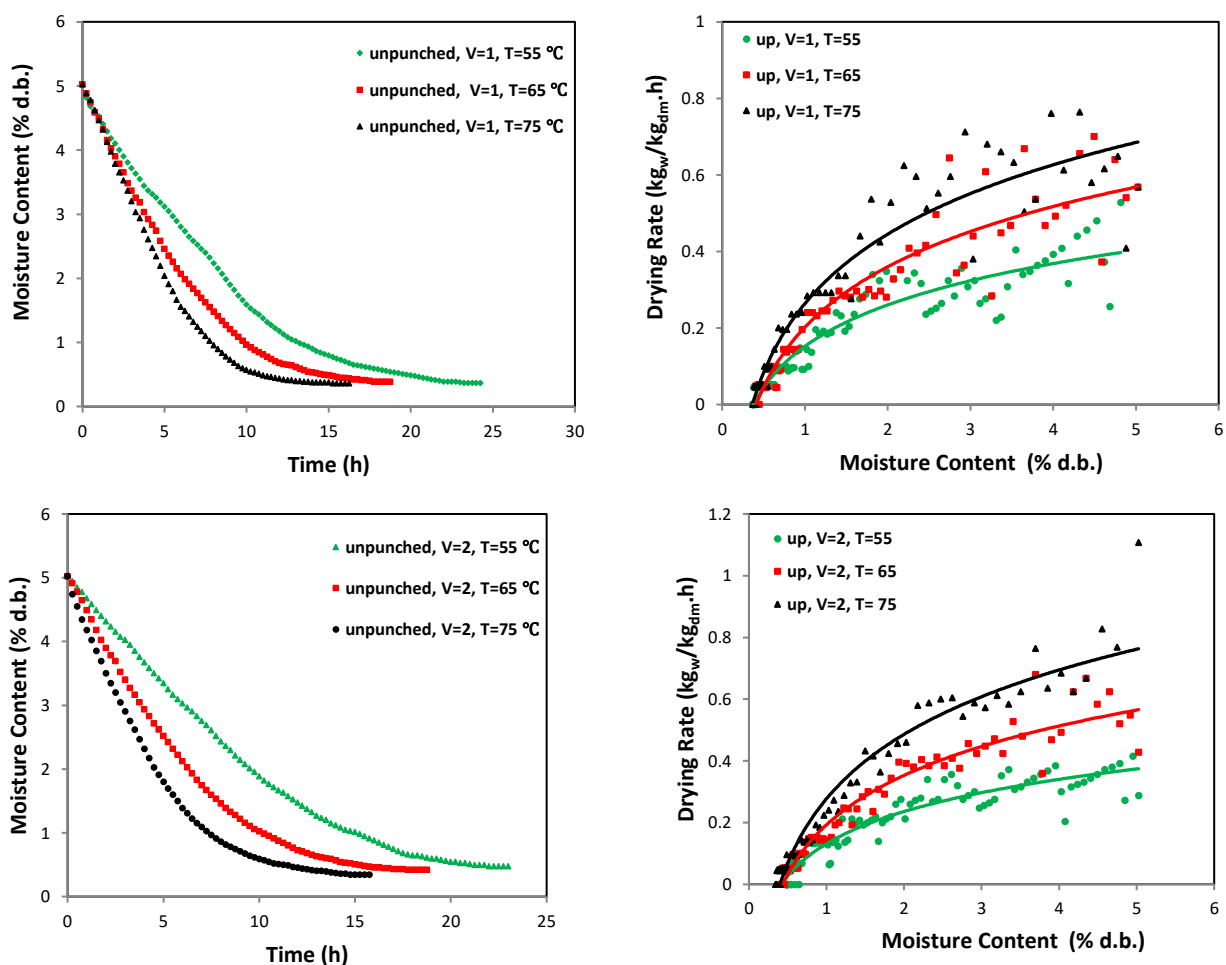


Figure 8. Effect of temperature on moisture content and drying rate in the unpunched pepper and air velocity of 1 m/s (top row), 2 m/s (bottom row)

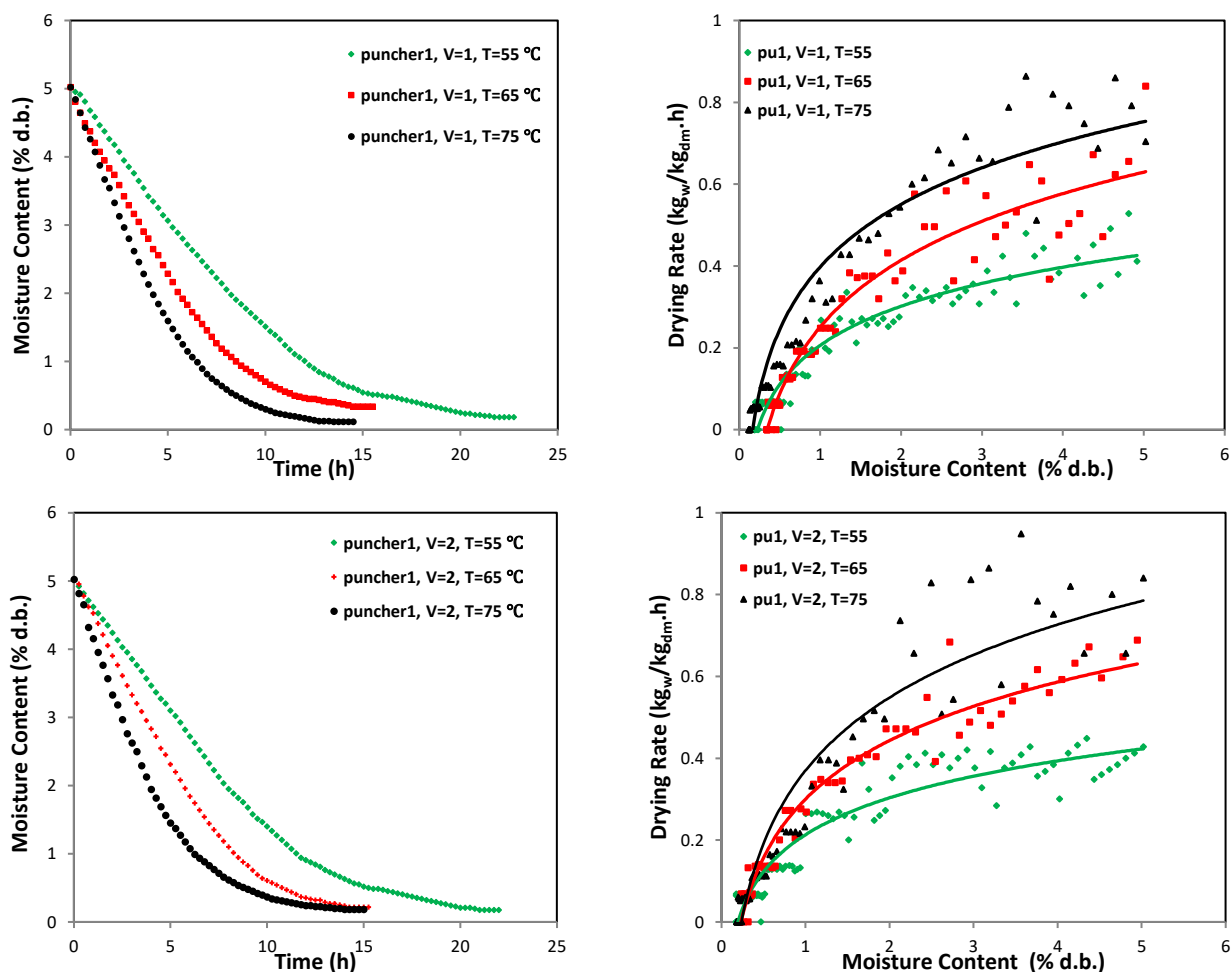
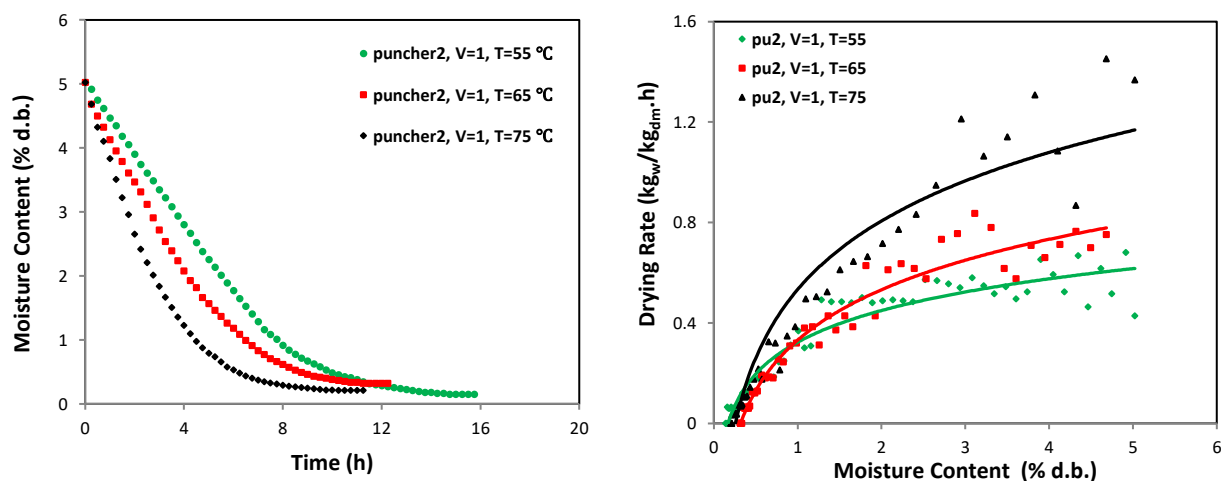


Figure 9. Effect of temperature on moisture content and drying rate in punched pepper with needle 1 and air velocity of 1 m/s (top row), 2 m/s (bottom row)



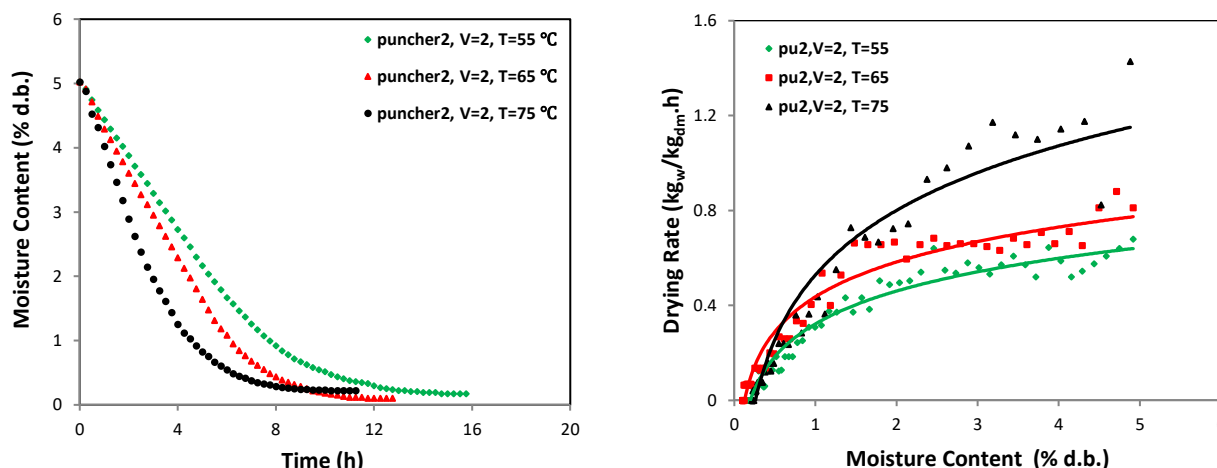


Figure 10. Effect of temperature on moisture content and drying rate in punched pepper with needle 2 and air velocity of 1 m/s (top row), 2 m/s (bottom row)

نفوذ جریان هوای خشک کننده را به داخل بافت خود داده و لذا تأثیر سرعت هوا در حذف رطوبت از این ماده ناچیز است. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد، در هر دما و در هر حالت پانچ کردن نیام‌ها، منحنی‌های خشک کردن در سرعت جابجایی هوای ۱ و ۲ m/s، تقریباً بر یکدیگر منطبق می‌باشند و سرعت جابجایی ۲ m/s با اختلاف بسیار کمی نسبت به سرعت ۱ m/s، بیشتر باعث کاهش زمان خشک کردن شده است. از دیدگاه کاربردی، این یافته اهمیت انتخاب دما و روش آماده‌سازی (پانچ کردن) را بیش از افزایش سرعت هوا برجسته می‌سازد؛ زیرا افزایش سرعت جریان هوا، برخلاف انتظار، بهبود قابل توجهی در کاهش زمان خشک کردن ایجاد نمی‌کند و تنها موجب افزایش مصرف انرژی فن‌ها خواهد شد. بنابراین، بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن فلفل قرمز باید بر کنترل دما و اصلاح ساختار پوسته (مانند پانچ کردن) متمرکز باشد تا علاوه بر کاهش زمان خشک کردن، کیفیت محصول از نظر رنگ و تندی نیز حفظ گردد.

چنانچه در نمودارهای سرعت خشک کردن مشاهده می‌گردد، شیب منحنی خشک کردن در دمای ۵۵°C بسیار کمتر از شیب منحنی در دو دمای ۶۵ و ۷۵°C می‌باشد. با افزایش دما نمونه‌ها با سرعت بیشتری خشک می‌شوند که ناشی از افزایش نیروی محرکه انتقال جرم در بافت فلفل می‌باشد. همچنین مقایسه سه نمودار نشان می‌دهد که شیب منحنی خشک کردن در حالت پانچ نشده بطور محسوسی کمتر از حالت پانچ شده می‌باشد. این امر بیانگر آن است که ایجاد منافذ مکانیکی در نیام‌ها، مسیرهای خروج رطوبت را تسهیل کرده و مقاومت نفوذی پوسته را کاهش می‌دهد. در نتیجه، نرخ خشک کردن افزایش یافته و زمان رسیدن به رطوبت نهایی کوتاه‌تر می‌شود.

۳-۱-۳ اثر سرعت جریان هوا

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر سرعت جابجایی هوا بر روی زمان خشک کردن معنی دار نبوده است. فلفل قرمز بدلیل پوسته نفوذ ناپذیر و مومی خود، کمتر اجازه

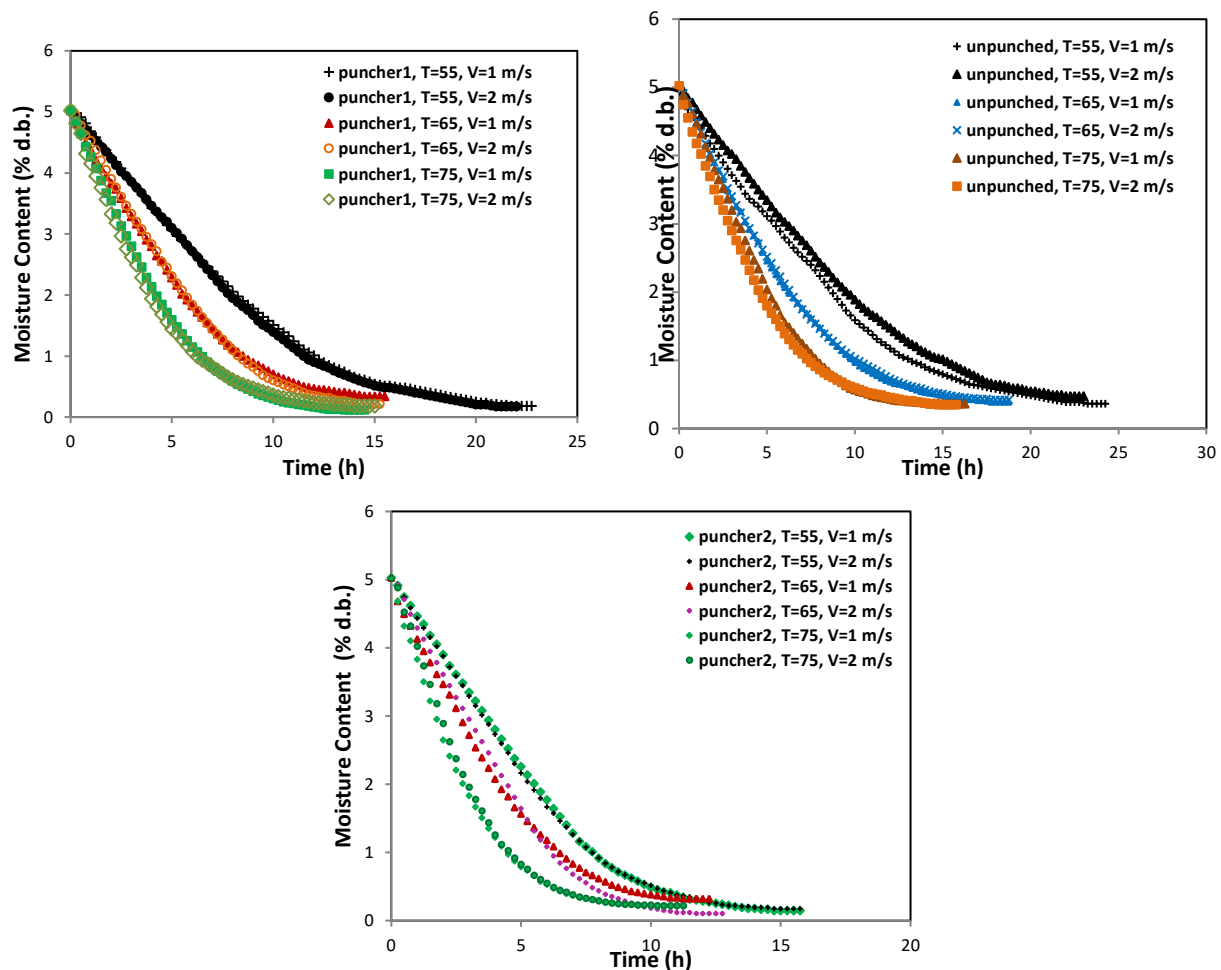


Figure 11. Effect of air velocity and temperature on moisture content and drying rate in the following cases: a) Unpunched b) Punched with needle 1 c) Punched with needle 2

داری با یکدیگر بودند. افزایش دما و افزایش قطر پانچ کننده هر دو باعث کاهش زمان خشک کردن شدند. اثر همزمان دما و قطر پانچ کننده بیش از اثرات منفرد آنها بر زمان خشک کردن مؤثر بود؛ به گونه‌ای که افزایش دما موجب تسريع تبخير و افزایش قطر پانچ کننده موجب تسهيل خروج بخار از بافت گردید و ترکیب این دو عامل، کاهش چشمگیری در زمان کل خشک کردن ایجاد کرد. از دیدگاه صنعتی، این نتایج اهمیت انتخاب شرایط مناسب دما و روش آماده سازی را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که ترکیب دمای بالاتر با پانچ کردن می‌تواند فرآیند خشک کردن را تسريع نموده و علاوه بر کاهش مصرف انرژی، کیفیت محصول نهایی از نظر حفظ رنگ و تندی نیز بهبود یابد. در خصوص نرخ خشک کردن، هر یک از دو عامل دما و قطر پانچ کننده به طور جداگانه اثر معنی داری داشتند، اما اثر همزمان آنها بر نرخ خشک کردن معنی دار نبود. در بسیاری از فرآیندهای

۳-۴ تجزیه و تحلیل‌های آماری فرایند خشک کردن

تأثیر هر یک از عوامل پانچ کردن، دما و سرعت جابجایی هوا و نیز اثر متقابل فاکتورها بر روی زمان و سرعت خشک کردن، از طریق مقایسه آماری میانگین‌ها بررسی گردید. نوساناتی که در نتایج حاصل از سه تکرار دیده می‌شود، ناشی از عوامل غیر قابل کنترلی مانند متغیر بودن اندازه و شکل هندسی ماده اولیه، میزان رسیدگی، رطوبت اولیه و غیره می‌باشد که عدم تطابق کامل تکرارهای یک آزمایش را بدنبال خواهد داشت. به همین دلیل در آنالیزهای بعمل آمده، میانگین تکرارها مورد بررسی قرار گرفته اند.

طبق نتایج، متغیر A (سرعت جابجایی هوا) و تأثیرات متقابل آن با دو متغیر دیگر دارای اختلاف معنی دار نبوده، ولی دو متغیر B (پانچ کردن) و C (دما)، و نیز تأثیر متقابل آنها با یکدیگر، با درصد احتمال کمتر از ۰/۰۱ دارای اختلاف معنی

که در بسیاری از محصولات غذایی، زمان خشک‌کردن به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر برهم‌کنش دما و شرایط فیزیکی (ضخامت، قطر، جریان هوا) قرار می‌گیرد، اما نرخ خشک‌کردن اغلب با مدل‌های خطی یا نیمه‌تجربی بهتر برازش می‌شود و برهم‌کنش‌ها کمتر معنی‌دارند [۱۶].

خشک‌کردن، اثر دما غالب است و اثرات مکانیکی (مثل قطر یا ضخامت) بیشتر خطی عمل می‌کنند. در مطالعه نصرنیا و همکاران (۲۰۲۴) بر روی برنج نیز اثر دما و روش خشک‌کردن بر زمان کل خشک‌کردن معنی‌دار بود، اما نرخ خشک‌کردن بیشتر تحت سلطه‌ی دما بود و اثرات برهم‌کنش ضعیف‌تر و غیرمعنی‌دار گزارش شد [۱۵]. همچنین آدی و همکاران (۲۰۲۵) در بررسی خشک‌کردن محصولات غذایی مختلف بیان داشتند

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) for drying time (min)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	9.349E+05	8	1.169E+05	58.58	< 0.0001	significant
B-Puncher Diameter (mm)	3.218E+05	2	1.609E+05	80.66	< 0.0001	
C-Temperature (°C)	5.307E+05	2	2.654E+05	133.02	< 0.0001	
BC	68672.69	4	17168.17	8.61	0.0028	
Residual	19950.00	10	1995.00			
Lack of Fit	19921.88	9	2213.54	78.70	0.0873	not significant
Pure Error	28.13	1	28.13			
Cor Total	9.548E+05	18				

Std. Dev.	44.67	R²	0.9791
Mean	985.66	Adjusted R²	0.9624
C.V. %	4.53	Predicted R²	0.9454
		Adeq Precision	24.2755

مؤثر می‌باشد. معادله بدست آمده برای زمان خشک‌کردن بر اساس فاکتورهای کد شده که می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار خشک‌کردن فلفل قرمز تحت شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد:

$$\text{Drying Time (min)} = 993.06 + 139.44 \cdot B[1] + 39.44 \cdot B[2] + 228.19 \cdot C[1] - 40.14 \cdot C[2] + 41.81 \cdot B[1]C[1] + 66.81 \cdot B[2]C[1] - 4.86 \cdot B[1]C[2] - 73.61 \cdot B[2]C[2] \quad (11)$$

نتایج تحلیل واریانس برای زمان خشک‌کردن نشان داد که مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ بیانگر معنادار بودن عبارات مدل هستند. مقدار ضریب تعیین R^2 معادل ۰/۹۷۹۱ نشان دهنده این است که تغییر پذیری داده‌ها به خوبی توسط مدل شرح داده شده است. نزدیک بودن مقادیر ضریب تعیین تنظیم‌شده و ضریب تعیین پیش‌بینی (با اختلاف کمتر از ۰/۲)، نشان‌دهنده مناسب بودن مدل انتخاب شده است. پارامتر Adeq Precision نسبت سیگنال به نویز را نشان می‌دهد و مقادیر بالاتر از ۴ آن، بیانگر کفایت مدل برای تمایز بین فاکتورها و شناسایی عوامل مهم در فرآیند است. مقدار Adeq-Precision برای پاسخ زمان خشک‌کردن برابر ۲۴/۲۷۵۵ است که بسیار بالاتر از حداقل معیار بوده و نشان‌دهنده کفایت و قابلیت اعتماد مدل در غربال‌گری عوامل

Table 4. ANOVA for Drying Rate (Kg_w/Kg_{dm}.h)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.0938	4	0.0234	305.65	< 0.0001	significant
B-Puncher Diameter (mm)	0.0516	2	0.0258	336.51	< 0.0001	
C-Temperature (°C)	0.0403	2	0.0202	262.72	< 0.0001	
Residual	0.0011	14	0.0001			
Lack of Fit	0.0011	13	0.0001	16.06	0.1932	not significant
Pure Error	5.120E-06	1	5.120E-06			
Cor Total	0.0949	18				

Std. Dev.	0.0088	R ²	0.9887
Mean	0.3072	Adjusted R ²	0.9854
C.V. %	2.85	Predicted R ²	0.9788
		Adeq Precision	52.8768

افتاده و اختلاف مقادیر از دو طول موج ۲۴۸ و ۲۹۶ نانومتر ناچیز بود، میانگین مقادیر گزارش گردید.

نتایج نشان داد که میزان تندی در فلفل‌های پانچ‌نشده به‌طور معنی‌داری بیشتر از فلفل‌های پانچ‌شده است. این امر ناشی از تبخیر و خروج بخشی از ترکیبات عامل تندی از منافذ ایجاد شده در اثر پانچ‌کردن می‌باشد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که حالت پانچ‌نشده بیشترین میزان تندی را حفظ کرده و روش پانچ با سوزن قطر ۲mm و سپس ۳/۵ mm در اولویت‌های بعدی قرار دارند. هر سه حالت دارای اختلاف معنی‌داری با یکدیگر بودند. همچنین افزایش دما موجب افزایش میزان تندی محصول گردید. این امر بدلیل تبخیر بیشتر آب از محصول تغلیظ مواد عامل تندی می‌باشد؛ چرا که کاپسایسینوئیدها عموماً فرار نیستند؛ یعنی در فرآیند خشک‌کردن تبخیر نمی‌شوند بلکه در بافت باقی مانده و با کاهش رطوبت، غلظت آنها افزایش می‌یابد. مقایسه میانگین نشان داد که دمای ۷۵°C دارای بیشترین تأثیر بر میزان تندی بوده و دماهای ۶۵°C و ۵۵°C در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. سرعت جریان هوا اثر معنی‌داری بر میزان تندی نشان نداد. نتایج مشابهی توسط Wu و همکاران (۲۰۲۵) گزارش شد؛ آنان نشان دادند که خشک‌کردن با هوای داغ موجب حفظ محتوای کاپسائی سینوئید در فلفل قرمز گردید، در حالی که خشک‌کردن در سایه و آفتاب منجر به کاهش قابل توجه این ترکیبات شد [۱۷].

بر اساس نتایج تحلیل واریانس سرعت خشک‌کردن، مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ نشان دهنده معنادار بودن مدل و R² معادل ۰/۹۸۸۷ بیانگر این است که تغییر پذیری داده‌ها به خوبی توسط مدل شرح داده شده است. نزدیک بودن مقادیر Adjusted R² و Predicted R² بیانگر آن است که مدل انتخاب‌شده برای پیش‌بینی سرعت خشک‌کردن از دقت و قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است. مقدار F مربوط به عدم برازش ۱۶/۰۶ نشان می‌دهد که عدم برازش نسبت به خطای خالص معنی‌دار نیست. بنابراین مدل ارائه‌شده توانسته است رفتار واقعی داده‌ها را به‌طور مناسب توصیف کند. معادله بدست آمده برای سرعت خشک‌کردن بر اساس فاکتورهای کد شده:

$$\text{Drying Rate (kg(w)/kg(dm)·h)} = 0.3030 - 0.0544*B[1] - 0.0146*B[2] - 0.0625*C[1] + 0.0108*C[2] \quad (12)$$

۲-۳ میزان تندی

تأثیر عوامل دما، سرعت جابجایی هوا، پانچ‌کردن و نیز اثر متقابل آنها بر روی تندی مورد بررسی قرار گرفت. W₂₄₈ حساس‌تر به جذب کلی ترکیبات آروماتیک بوده و می‌تواند از باقی‌مانده‌ی رنگدانه‌ها (در صورت رنگ‌بری ناکامل) بیشتر تأثیر بپذیرد. W₂₉₆ انتخاب‌پذیری بالاتری نسبت به کاپسائی سینوئیدها دارد و معمولاً در برابر تداخل‌های رنگی کمی مقاوم‌تر است. با توجه به اینکه رنگ‌بری بطور کامل اتفاق

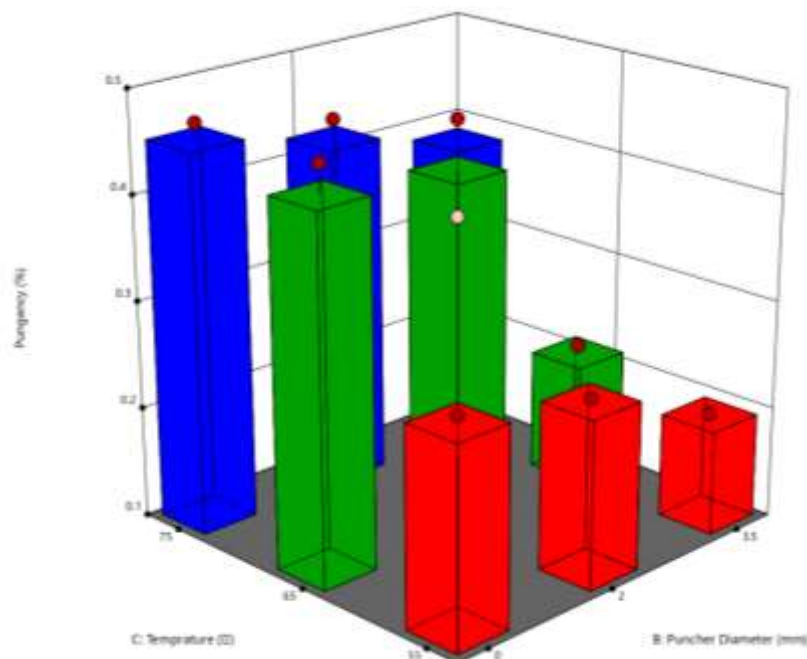


Figure 12. Effect of drying parameters on the pungency of red pepper

۳-۳ میزان رنگ

طبق نتایج حاصل از تجزیه آماری، سرعت جابجایی هوا دارای تأثیر معنی‌داری بر روی رنگ نبود؛ رنگدانه‌ها از جمله کاروتنوئیدها فراریت کمی دارند و در شرایط خشک‌کردن با جریان هوا و دماهای بالا، به‌جای تبخیر، در محصول باقی می‌مانند یا تخریب می‌شوند [۱۸]. در مقابل، پانچ کردن و دما با درصد احتمال کمتر از ۰/۰۰۰۱ دارای اثر معنی‌داری بر روی پارامتر رنگ بودند. نتایج نشان داد که میزان رنگ در فلفل پانچ نشده بیشتر از فلفل پانچ شده است. همچنین با افزایش قطر منافذ، میزان رنگ کاهش می‌یابد. این امر بدلیل تأثیر جریان هوا و نفوذ بیشتر حرارت به داخل محصول و اثر نامطلوب بر رنگدانه‌ها می‌باشد. عدم پانچ‌کردن بیشترین اثر مثبت را بر حفظ رنگ داشت و پس از آن پانچ توسط سوزن با قطر ۲mm و پانچ توسط سوزن با قطر ۳/۵ mm در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. میانگین میزان رنگ در دمای ۶۵ °C بیشتر از دو دمای

دیگر بود (در دمای ۶۵ °C، قطر پانچ ۲ mm و سرعت هوای ۲m/s، میزان رنگ استخراج‌شده بر اساس جذب نوری در طول موج ۴۵۸ نانومتر معادل ۳/۷۷۶ تعیین شد). در دمای پایین‌تر بدلیل قرار گرفتن محصول به مدت طولانی‌تر در معرض حرارت و در دمای بالا بدلیل تأثیر درجه حرارت زیاد بر رنگدانه‌ها، کاروتنوئیدها بیشتر تخریب می‌شوند. سرعت هوا، به دلیل فراریت اندک رنگدانه‌ها اثر قابل‌توجهی بر میزان رنگ ندارد. نتایج مشابهی توسط کریژکوفسکی و همکاران (۲۰۲۴) گزارش شد که نشان داد افزایش دما موجب تخریب کاروتنوئیدها و کاهش شاخص‌های رنگی در فلفل قرمز می‌شود، در حالی‌که خشک‌کردن در دماهای پایین‌تر بهترین حفظ رنگ را فراهم می‌نماید؛ آنها میزان جذب نوری استخراج‌شده را در محدوده‌ی ۳/۵ تا ۴/۲ گزارش کردند [۱۲].

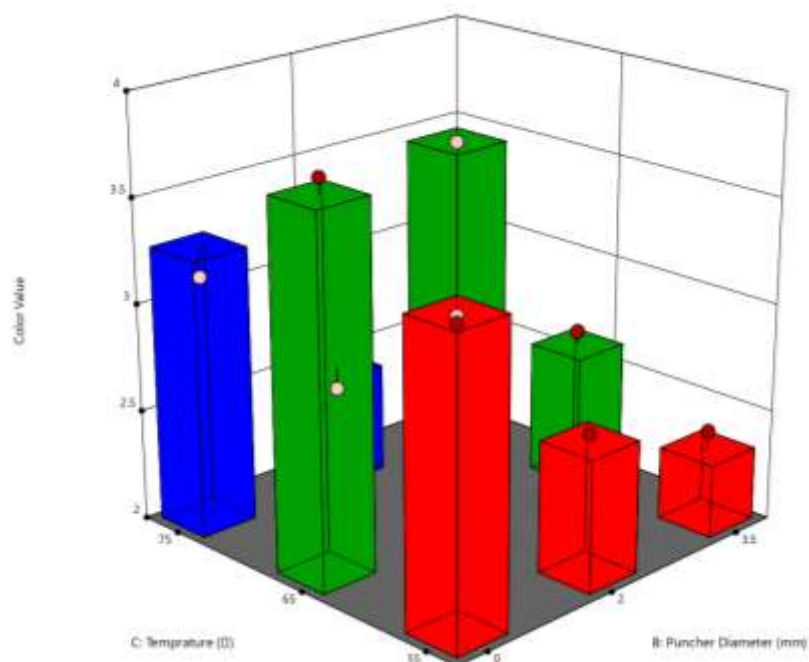


Figure 13. Effect of drying parameters on the color of red pepper

افزایش قطر منافذ ایجاد شده، میزان رطوبت کاهش یافت که این امر ناشی از نفوذ مؤثرتر حرارت و جریان هوا به داخل بافت محصول می‌باشد. به علاوه، میانگین میزان رطوبت در دمای 65°C در محدوده استاندارد قرار گرفت و نشان داد که این شرایط می‌تواند به عنوان یک دمای بهینه برای دستیابی به رطوبت مطلوب در فرآیند خشک کردن فلفل قرمز در نظر گرفته شود.

۳-۴ میزان رطوبت نهایی

آنالیز آماری نشان داد که پانچ کردن و دما با درصد احتمال کمتر از ۰/۰۰۰۱ اثر معنی‌داری بر روی میزان رطوبت فلفل قرمز داشتند؛ اما سرعت هوا و تأثیرات متقابل فاکتورهای مختلف دارای اثر معنی‌داری بر روی میزان رطوبت نبودند. همچنین با

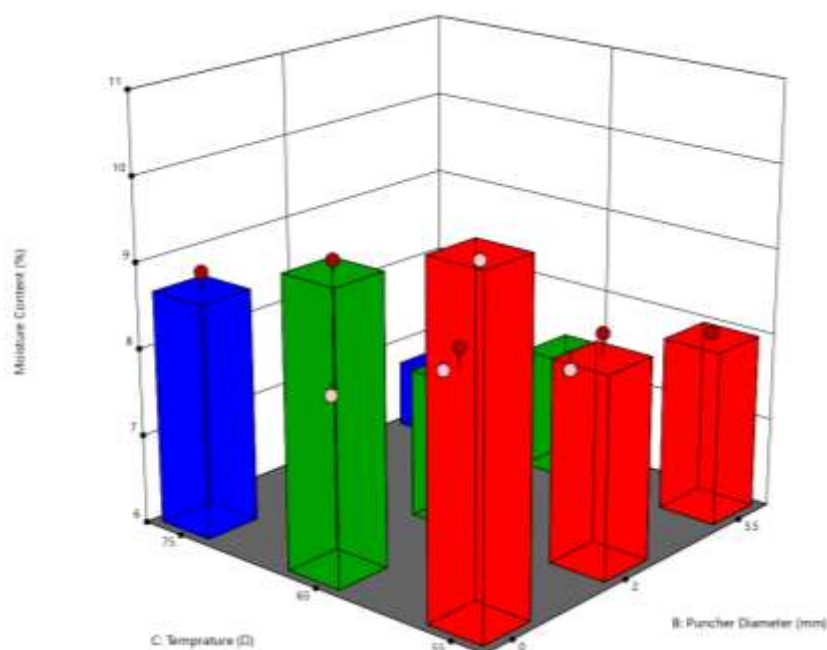


Figure 14. Effect of drying parameters on the moisture content of red pepper

نشان داد که بیانگر محدودیت این مدل در توصیف سینتیک خشک‌کردن فلفل قرمز تحت شرایط آزمایش بود. به‌طور کلی، نتایج تأیید می‌کنند که مدل‌های غیرخطی مانند پیچ و میدیلی توانایی بیشتری در توصیف رفتار کاهش رطوبت در فرآیند خشک‌کردن دارند. در میان آن‌ها، مدل میدیلی به دلیل انعطاف‌پذیری و دقت بالا، به‌عنوان بهترین گزینه برای شبیه‌سازی و مطالعات بهینه‌سازی آینده پیشنهاد می‌شود. در پژوهش Krzykowski و همکاران (2024) نیز مدل‌های غیرخطی به‌ویژه میدیلی به‌عنوان دقیق‌ترین مدل معرفی شده‌اند [۱۲]. همچنین مطالعه Wisdom (2023) نیز تأیید می‌کند که مدل میدیلی نسبت به مدل‌های ساده‌تر مانند نیوتن، توانایی بیشتری در توصیف سینتیک خشک‌کردن دارد [۱۹]. بنابراین، نتایج حاضر ضمن تأیید مطالعات پیشین، برتری مدل میدیلی را در شبیه‌سازی فرآیند خشک‌کردن فلفل قرمز نشان می‌دهد.

۳-۵ ارزیابی برازش مدل‌ها

برای توصیف رفتار خشک‌کردن فلفل قرمز، سه مدل ریاضی شامل نیوتن، پیچ و میدیلی بر داده‌های تجربی نسبت رطوبت (MR) برازش شدند. عملکرد هر مدل با استفاده از شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، کای‌دو (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مربوط به پارامترهای مدل‌ها و شاخص‌های برازش در جدول (۵) ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج، مدل میدیلی بهترین برازش را با داده‌های تجربی نشان داد؛ به‌طوری‌که بالاترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر χ^2 و RMSE را داشت. این امر بیانگر تطابق بسیار قوی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و داده‌های مشاهده‌شده است. مدل پیچ نیز عملکرد مناسبی داشت و نسبت به مدل نیوتن دقت بالاتری ارائه کرد. در مقابل، مدل نیوتن با وجود سادگی ساختار، مقدار R^2 پایین‌تر و خطاهای بالاتر (χ^2 و RMSE) را

Table 5. Comparison of drying models based on fitting parameters and statistical indices

Model	Parameters (k, n, a, b)	R^2	χ^2	RMSE
Newton model	$k = 0.2792$	0.9613	0.012506986	0.110866354
Page model	$k = -0.1027, n = 1.3692$	0.996108637	0.000376019	0.019053944
Midilli model	$a = 0.9563, k = -0.0867, n = 1.4043, b = -0.0022$	0.998927265	0.0001075	0.010004151

پارامترهای فرآیند نشان داد که تغییرات زمان خشک‌کردن به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر دما و آماده‌سازی قرار داشته و تأثیر سرعت هوا بسیار ناچیز بود. طبق نتایج، در دمای 75°C ، سرعت جابجایی هوای 2 m/s و حالت پانچ شده با سوزن شماره (۲)، کمترین زمان خشک‌کردن حاصل شد؛ در حالی‌که در دمای 55°C ، سرعت جابجایی هوای 1 m/s و حالت پانچ نشده، بیشترین زمان خشک‌کردن مورد نیاز بود. بر اساس تحلیل آماری، تیمار با دمای 65°C ، سرعت جریان هوای 1 m/s و قطر پانچ 2 mm به‌عنوان شرایط بهینه خشک‌کردن فلفل قرمز تعیین گردید. این تیمار ضمن حفظ کیفیت محصول (تندی، رنگ و رطوبت مطلوب)، زمان خشک‌کردن را به حداقل رساند. علاوه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرآیند خشک‌کردن فلفل قرمز در خشک‌کن سینی‌دار با جریان متقاطع هوا، تحت تأثیر سه عامل دما، سرعت جریان هوا و نوع آماده‌سازی (پانچ‌کردن) مورد بررسی قرار گرفت. منحنی‌های خشک‌کردن و سرعت خشک‌کردن برای تحلیل رفتار رطوبت‌زدایی رسم شده و شاخص‌های کیفی محصول شامل تندی، رنگ و رطوبت نهایی اندازه‌گیری گردید؛ سپس داده‌های حاصل، توسط نرم افزار آماری Design Expert 13، مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند. بررسی اثر

تضاد منافع

نویسندگان هیچگونه تضاد منفعی را اعلام نمی‌کنند. پژوهش حاضر بر اساس اصول صداقت علمی و بی طرفی انجام شده است.

بیانیه تأمین مالی

این تحقیق حمایت مالی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده در طراحی، تحلیل، نگارش و تأیید نسخه نهایی مشارکت داشته است.

بر این، برازش داده‌های تجربی با مدل‌های ریاضی نشان داد که مدل میدیلی با داشتن بالاترین ضریب تعیین (R^2) و کمترین مقادیر خطا، دقیق‌ترین پیش‌بینی را از رفتار خشک‌کردن ارائه داد. بنابراین، استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن فلفل قرمز در شرایط صنعتی توصیه می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش بنا به درخواست، از طریق نویسنده مسئول در دسترس قرار خواهند گرفت.

۵-مراجع

- [1] İ. Doymaz, O. İsmail, Drying and rehydration behaviors of green bell peppers, Food Science and Biotechnology, 2010, **19** p: 1449-1455.
- [2] M. A-Hossain, B. Bala, Moisture isotherm characteristics for red chilli, Drying Technology, 2000, **18**(1-2) p: 503-515.
- [3] M. Yasin, L. Li, M. Donovan-Mak, Z.-H. Chen, S.K. Panchal, Capsicum waste as a sustainable source of capsaicinoids for metabolic diseases, Foods, 2023, **12**(4) p: 907.
- [4] A. Dobón-Suárez, P.J. Zapata, M.E. García-Pastor, A Comprehensive Review on Characterization of Pepper Seeds: Unveiling Potential Value and Sustainable Agrifood Applications, Foods, 2025, **14**(11) p: 1969.
- [5] M. Hossain, B. Bala, Thin-layer drying characteristics for green chilli, Drying Technology, 2002, **20**(2) p: 489-505.
- [6] H. Darvishi, A.R. Asl, A. Asghari, M. Azadbakht, G. Najafi, J. Khodaei, Study of the drying kinetics of pepper, Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2014, **13**(2) p: 130-138.
- [7] E. Getahun, D.T. Ebissa, Investigation of optimal drying conditions of red chili peppers in a hot air cabinet dryer, Case Studies in Thermal Engineering, 2024, **59** p: 104586.
- [8] N. Rajamurugu, B. Srimanickam, K. Elangovan, S. Srividhya, B. Poorani, R. Krishnamoorthy, N. Van Minh, Optimizing Red Chili Drying Using Machine Learning Modelling of Solar Vent and Open-Air Drying with Seasonal Performance Analysis, Case Studies in Thermal Engineering, 2025, p: 107074.
- [9] A. Vega, P. Fito, A. Andrés, R. Lemus, Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo), Journal of food Engineering, 2007, **79**(4) p: 1460-1466.
- [10] J. Wang, Y.-P. Pei, C. Chen, X.-H. Yang, K. An, H.-W. Xiao, High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying behavior of red pepper via altering cellular structure, pectin profile and water state, Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, **83** p: 103246.
- [11] H. Pinar, N. Çetin, B. Ciftci, K. Karaman, M. Kaplan, Biochemical composition, drying kinetics and chromatic parameters of red pepper as affected by cultivars and drying methods, Journal of Food Composition and Analysis, 2021, **102** p: 103976.
- [12] A. Krzykowski, S. Rudy, R. Polak, B. Biernacka, A. Krajewska, E. Janiszewska-Turak, I. Kowalska, J. Żuchowski, B. Skalski, D. Dzik, Drying of red chili pepper (Capsicum annuum L.): Process kinetics, color changes, carotenoid content and phenolic profile, Molecules, 2024, **29**(21) p: 5164.
- [13] International standard, chillies and chilli oleoresins, determination of total capsaicinoid content, part 1, 2, Iso 7543., in.
- [14] H. Tokallipour, Principles of Food Drying and Agricultural Products, 2nd Edition ed., AiiZh Publications, Tehran, Iran, 2021.
- [15] E. Nasrnia, M. Sadeghi, A. Raeisi, A Study of Energy Consumption and Drying Rate: Comparison of Continuous and Intermittent Drying Methods of Rough Rice, Biomechanism and Bioenergy Research, 2024, (2) p.
- [16] S.A.O. Adeyeye, T.J. Ashaolu, A.S. Babu, Food drying: A review, Agricultural reviews, 2022, **1**(8) p: 1-8.
- [17] D. Wu, W. Yang, J. Chen, Z. Zhu, C. Chen, N. Wang, K. Wu, J. He, W. Fu, Impact of different drying methods on the quality and flavor of two chili peppers (Capsicum annuum L.) varieties: Chemical composition and volatile compounds, Food Chemistry: X, 2025, **29** p: 102757.
- [18] P.A.O. Carmona, L.C. Garcia, J.A.d.A. Ribeiro, L.F. Valadares, A.d.F. Marçal, L.F. de França, S. Mendonça, Effect of solids content and spray-drying operating conditions on the carotenoids microencapsulation from pressed palm fiber oil extracted with supercritical CO₂, Food and Bioprocess Technology, 2018, **11**(9) p: 1703-1718.

- [19] E.E. Wisdom, Study On Activation Energy, Moisture Diffusivity Effectiveness and Mathematical Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Red Pepper (*Capsicum Annum L.*), p.



Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage: www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Optimization of red pepper drying conditions in a tray dryer with cross current air flow

Zahra Hejri*

* Department of Chemical Engineering, Qu.C., Islamic Azad University, Quchan, Iran

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article History: Received: 2026/01/08 Review: 2026/04/04 Accepted: 2026/05/09 Keywords: Red pepper, tray dryer, temperature, punching, air velocity DOI: 10.48311/fsct.2026.118853.83028 *Corresponding Author E- za.hejri@iau.ac.ir	In this study, the effect of temperature, air velocity, and punching of the pods on the drying process of red pepper in a cross-flow tray dryer was investigated. Red pepper samples were dried at three temperatures (55, 65, and 75 °C), two air velocities (1 and 2 m/s), and three preparation methods: unpunched, punched with a 2-mm-diameter needle (needle No. 1), and punched with a 3.5-mm-diameter needle (needle No. 2). The qualitative indicators of the final product, including pungency, color, and moisture content, were evaluated. According to the experimental results and statistical analyses, the optimum drying conditions for red pepper in the cross-flow tray dryer were determined to be a drying temperature of 65 °C, a punch diameter of 2 mm, and an air velocity of 1 m/s. Under these conditions, the drying rate was 0.299 kg_w/kg_{dm}.h, the pungency was 0.427 wt.% total capsaicinoids, and the extracted color value, measured as absorbance at 458 nm, was 3.776. Furthermore, the results showed that the Page and Midilli nonlinear models provided a better fit for the drying kinetics of red pepper than the Newton model, as indicated by their higher coefficients of determination (R²) and lower RMSE and χ^2 values.