بررسی سینتیک خشک شدن زیره سبز در یک خشک‌کن خورشیدی در دو حالت تابش مختلط و غیرمستقیم

مهدی مرادی* و علی زمردیان[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۷/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۳/۱۷)

چکیده

در این تحقیق از یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی کابینتی برای خشک کردن لایه نازک زیره سبز در دو حالت مختلف خشک شدن (مختلط و غیر مستقیم) و چهار جریان متفاوت هوای خشک‌کننده (سه جریان فعال و یک جریان غیرفعال) استفاده گردید. هر کدام از آزمایش‌ها در سه تکرار و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام گرفت. مقدار رطوبت زیره سبز در هر زمان نمونه‌برداری در طول زمان یکسان خشک شدن (۹۰ دقیقه برای همه آزمایش‌ها) برای این آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. متوسط رطوبت اولیه دانه‌های زیره سبز ۴۳/۵ درصد بر پایه خشک بوده و قرار بود نمونه‌ها به مدت ۹۰ دقیقه داخل دستگاه قرار داده شوند تا خشک گردند (متوسط ۸ درصد بر پایه خشک). دو فاکتور جریان هوای خشک‌کننده و حالت خشک شدن اثر معنی‌داری بر این درصد رطوبت داشت. بر اساس مقایسه میانگین‌های مقدار رطوبت محصول به وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن خشک کردن با جریان هوای خشک‌کننده با جابه‌جایی آزاد توصیه شد. مدت زمان رسیدن درصد رطوبت دانه از ۴۳/۵ درصد به ۸ درصد برای این شرایط ۵۵ دقیقه بود و متوسط شدت تابش انرژی خورشید در این مدت ۷۵۰ وات بر متر مربع، متوسط دمای محیط ۳۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی محیط ۲۰درصد بود. استفاده از دستگاه خشک‌کن خورشیدی در حالت تابش مختلط با جریان جابه‌جایی آزاد هوای خشک‌کننده موجب شد که درصد رطوبت زیره سبز در مدت ۹۰ دقیقه از ۴۳/۵ درصد به ۴/۹۵ درصد (برپایه خشک) برسد.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن خورشیدی، زیره سبز

مقدمه

در میان مراحل مختلف آماده‌سازی مواد غذایی برای خشک کردن یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها، کاهش رطوبت آن است که اگر به طور صحیح انجام نگیرد، می‌تواند باعث افت کیفی وکمی محسوس محصول گردد(۱۲).

در مقایسه با سایر فعالیت‌ها جهت نگه‌داری مواد غذایی، خشک کردن انرژی زیادی به مصرف می‌رساند. در ایالت‌های مرکزی آمریکا حدود ۶۰ درصد کل انرژی مورد نیاز در عمل خشک کردن ذرت دانه‌ای مصرف می‌شود(۶).

خشک کردن آفتابی پرکاربردترین روش برای استفاده در محصولات کشاورزی مخصوصاً درکشورهای آسیایی است. در این روش محصولات روی یک سطح صاف و بزرگ پخش

۱. به ترتیب کارشناس ارشد و دانشیار ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mehdimoradi.ir@gmail.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]

شده و انرژی خورشید به طور مستقیم توسط محصول جذب می گردد. البته این روش دارای معایبی مانند خطر ریزش باران، وزش باد، حمله آفات، پرندگان، حشرات و سایر حیوانات است. خشک‌کن‌های خورشیدی می‌تواند به عنوان یک روش خوب برای کم کردن انرژی مصرفی خشک کردن و جلوگیری از مشکلات مذکور به کار رود (۸). عموما خشک‌کن‌های خورشیدی به سه دسته مستقیم(Direct mode)، غیر مستقیم (Indirect mode) و مختلط (Mixed mode) تقسیم‌بندی می‌شوند. در نوع مستقیم، اتاقک خشک‌کن حاوی محصول بوده و انرژی خورشیدی به طور مستقیم از طریق پوشش شفاف به محصول می‌تابد. در سیستم غیر مستقیم انرژی خورشیدی در یک جمع کننده خورشیدی جداگانه جذب شده، باعث گرم شدن هوای عبوری از جمع‌کننده گشته و سپس این هوای گرم شده باعث خشک شدن محصول می‌شود. در این روش محصول در معرض تابش مستقیم نور خورشید نیست. در نوع مختلط که ترکیبی از هر دو نوع مستقیم و غیر مستقیم است، محصول به طور همزمان توسط دو روش تابش مستقیم نور خورشید و هوای گرم شده توسط جمع کننده خورشیدی خشک می‌شود(۱۰).

خشک‌کن خورشیدی می‌تواند از جهت دیگر به دو نوع فعال (Active) و غیر فعال (Passive) تقسیم‌بندی شود. اصول کار نوع غیر فعال بر اساس اختلاف دما و نتیجتاً اختلاف دانسیته هوای درون و بیرون اتاقک خشک‌کن است. این اختلاف دانسیته باعث ایجاد نیروی محرک (نیروی شناوری (Buoyant force)) برای هوا شده تا در طول بستر خشک‌کن به حرکت در آید. به عبارت دیگر این سیستم نیاز به فن الکتریکی جهت راه‌اندازی هوا در طول بستر محصول ندارد در حالی که نوع فعال برای به جریان انداختن هوا در طول بستر محصول نیازمند به پروانه الکتریکی برای جابه‌جایی هواست (۵).

زیره سبز یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی و ادویه‌ای است که با آب و هوای گرم و خشک سازگار است. این گیاه دوکی شکل بوده و وزن هزار دانه آن بین ۲۰-۱۵گرم است. هم‌چنین از آن به عنوان طعم دهنده در غذا، افزایش شیر در مادران شیرده و نیز جهت از بین بردن نفخ معده استفاده می‌شود. بیشترین میزان تولید آن در کشورهای خاورمیانه علی‌الخصوص ایران است. حدود ۹۵ درصد محصول زیره سبز تولیدی در ایران مربوط به منطقه خراسان می‌باشد (۳). در سال ۱۳۸۵ کل سطح زیر کشت این محصول در ایران حدود۵۰۰۰۰ هکتار بوده که از این سطح، حدود۱۵۰۰۰ تن زیره خشک برداشت شده است. تاکنون گزارشی در مورد مطالعه تحقیقاتی بر روی خشک‌کن خورشیدی زیره سبز تحت جریان چندگانه هوا توسط نگارندگان مشاهده نشده است. ولی کارهای زیادی روی محصولات مشابه انجام گرفته است.

برخی از محققین فرآیند خشک کردن لایه نازک شلتوک را در محیط روباز، خشک‌کن نوع کابینتی و خشک‌کن خورشیدی نوع مختلط گزارش کردند. نتایج نشان داد که نوع مختلط از نظر زمان خشک شدن نسبت به دو نوع دیگر ارجحیت دارد (۵ و۱۱).

زمردیان و علامه، به بررسی خشک شدن برنج به صورت لایه نازک در یک خشک‌کن خورشیدی از نوع غیرفعال مختلط پرداختند. جریان هوا در این خشک‌کن به صورت جابه جایی آزاد(طبیعی) بود. آزمایش ها در سه عمق بستر ۲، ۴و ۶ سانتی‌متری انجام گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بستر ۲ سانتی‌متری شرایط بستر لایه نازک در خشک کردن به شیوه خورشیدی را دارا می‌باشد، در صورتی که بسترهای ۴و۶ سانتی‌متری چنین چیزی را نشان ندادند. هم‌چنین مشخص شد که محصول در سر تاسر بستر دانه به طور یک‌نواخت خشک نمی‌شود این موضوع به دلیل نوع محصول و حالت توزیع دما در محفظه خشک‌کن بود(۲).

یالدیز و ارتکین (۹) یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با جابه‌جایی اجباری طراحی کردند. از این خشک‌کن برای خشک کردن کدو تنبل، فلفل سبز، لوبیا سبز و پیاز به صورت لایه نازک استفاده شد. برای مطالعه تأثیر دبی هوا بر سرعت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]

خشک‌شدن از سه جریان مختلف هوا استفاده شد و هم‌چنین مقداری از محصول به‌صورت طبیعی خشک‌شد. سرعت خشک شدن به‌شکل معنی‌داری تحت تأثیر سرعت هوای خشک‌کننده بود. با افزایش سرعت هوا سرعت خشک شدن فلفل سبز و لوبیا سبز افزایش یافت و سرعت خشک شدن پیاز و کدو تنبل کاهش یافت. در کلیه نمونه‌ها در حالت خشک‌شدن طبیعی زیر نور خورشید در فضای باز سرعت خشک شدن افزایش یافت. آنها هم‌چنین برای محصولات مختلف رابطه‌ای برای پیش‌بینی نسبت رطوبت در زمان‌های مختلف با توجه به سرعت هوا ارائه کردند(۹).

هدف از انجام پژوهش حاضر به دست آوردن نرخ خشک شدن زیره سبز در حالت‌های مختلف خشک شدن (غیر مستقیم و مختلط) در دو شکل فعال (۳ جریان متفاوت هوای خشک کننده) و غیر فعال (جابه جایی آزاد هوای خشک کننده) و انتخاب بهترین حالت خشک کردن است.

مواد و روش‌ها

زیره سبز مورد استفاده در این تحقیق از مزارع شهرستان فردوس واقع در شرق ایران در بهار ۸۶ تهیه گردید و آزمایش‌هایی در بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در بهار و تابستان انجام گرفت.

محصول با دست تمیز شده و در طول ۲۴روز مدت آزمایش در یخچال تحت دمای ۴ درجه سلسیوس نگه‌داری شد. رطوبت اولیه دانه‌ها ۴۳/۵درصد (پایه خشک) بود.

جهت بیشترین کارایی زاویه جمع کننده انرژی خورشیدی با افق باید ۱۵ درجه بیشتر از عرض جغرافیایی محل باشد از آنجایی که عرض جغرافیایی شیراز ۳۰درجه است این زاویه ۴۵ درجه انتخاب گردید(۷).

دمای هوا به وسیله سنسورهای حرارتی(Thermistor) (SMT – 160) (۷ عدد) در قسمت‌های مختلف دستگاه خشک‌کن اندازه‌گیری شد. دقت این حسگرها ۰/۵°C بوده و دما توسط سیستم پردازش داده‌ها (Data acquisition system) در کامپیوتر نمایش داده و ذخیره شد. دو عدد از حسگرها در مدخل ورودی هوا به جمع کننده خورشیدی و سه عدد در مدخل ورودی هوا به اتاقک خشک‌کن (محفظه آرام کننده خشک‌کن) و دو تای دیگر در قسمت خروجی هوا از خشک‌کن نصب شدند. اندازه‌گیری دما در هر ۵ دقیقه انجام گرفت. شدت نور خورشید نیز مرتباً و در هر ۵ دقیقه به وسیله نورسنج خورشید (Thermistor) (سیلیکونی) اندازه‌گیری شد و در کامپیوتر ثبت گردید. این دستگاه در کنار خشک‌کن خورشیدی و جمع کننده و مانند آن تحت زاویه ۴۵ درجه قرار داده شد. نورسنج مورد استفاده در این طرح میزان تابش‌دهی کل را بر حسب وات بر متر مربع اندازه‌گیری می‌کرد. میزان رطوبت دانه‌ها توسط دستگاه آون الکتریکی در دمای ۱۰۵درجه سلسیوس به مدت ۱۶ ساعت به دست آورده شد(۴).

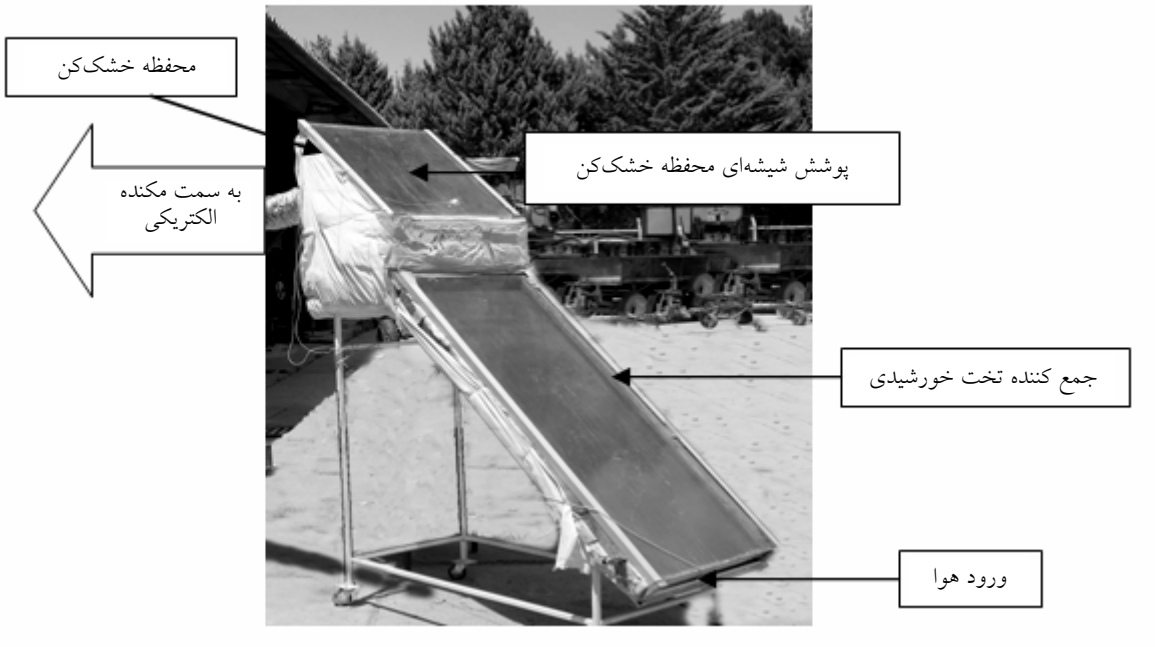
در هر آزمایش ۶ بار نمونه‌گیری صورت گرفت که فواصل نمونه‌برداری در اوایل انجام آزمایش به دلیل نرخ بالای کاهش رطوبت محصول، کمتر انتخاب گردید.

در این تحقیق از یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی کابینتی مطابق شکل۱ استفاده شد. این دستگاه شامل یک جمع کننده خورشیدی تخت به ابعاد ۱/۵×۰/۵ متر، یک اتاقک خشک‌کن به شکل ذوزنقه به ارتفاع ۴۲۰میلی‌متر، قاعده بزرگ ۵۳۰، قاعده کوچک ۳۳۰ میلی‌متر و عرض ۵۰۰ میلی‌متر(شکل۱) و یک سینی به ابعاد۲۲۰×۳۳۰ میلی‌متر جهت نگه‌داری محصول بود. دانه‌ها به صورت لایه‌ای نازک روی سینی به طور یکنواخت پهن می‌شدند. سینی حاوی محصول در داخل اتاقک خشک‌کن قرار داده می‌شد. هوا از درون جمع کننده خورشیدی که روی آن یک شیشه شفاف بود، مکیده می‌شد. سپس هوا از زیر سینی حاوی محصول عبور کرده و موجب انتقال حرارت به دانه‌های زیره سبز و نهایتاً خشک شدن آن می‌شد. در حالت فعال، فن مکنده روشن ولی در حالت غیر فعال آزمایش‌ها در حالت فن خاموش صورت می‌گرفت و هوا به طور آزاد از سیستم خشک‌کن عبور می کرد.

این دستگاه در دوحالت مختلف خشک شدن (مختلط و غیر مستقیم) به دو صورت فعال(سه جریان هوا) و غیر فعال

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]



شکل ۱. خشک کن خورشیدی مورد استفاده در طرح

(جابه‌جایی آزاد) به کار گرفته شد. تعداد آزمایشات ۲۴ عدد (۸ تیمار در سه تکرار) بود که در ۲۴ روز انجام گرفت.

برای تبدیل حالت مختلط به حالت غیر مستقیم از یک پارچه ضخیم چندلا استفاده شد. این پارچه روی شیشه شفاف اتاقک خشک‌کن قرار داده شد(حالت غیرمستقیم).

برای اندازه‌گیری دبی هوای خشک‌کننده ابتدا سرعت هوای مکیده شده توسط فن مکنده را اندازه‌گیری کرده سپس آن را در سطح مقطع خروجی هوا ضرب کرده تا دبی هوای خشک‌کننده بر حسب متر مکعب بر ثانیه به دست آید. جهت اندازه گیری سرعت هوای خشک‌کننده از یک باد سنج توربینی (Solarimeter) (yk-2001AL) با دقت ۰/۱متر بر ثانیه استفاده شد. به منظور تغییر سرعت هوای خشک‌کننده از یک دمپر صفحه‌ای که درون لوله خروجی فن در محل مناسب نصب شده بود، استفاده گردید. با تغییر موقعیت و تثبیت این دمپر، سرعت هوای خشک‌کننده تغییر می‌کرد.

از آنجایی که شدت تابش خورشید در هنگام ظهر حداکثر و تقریباً ثابت است، آزمایش‌ها روزهای آفتابی از ساعت ۱۱:۳۰شروع شده و تا ساعت ۱بعد از ظهر ادامه می یافت. متوسط شدت تابش انرژی خورشیدی در زمان آزمایشات ۷۵۰وات بر متر مربع، متوسط درجه حرارت محیط ۳۲درجه سلسیوس و رطوبت نسبی محیط ۲۰درصد بود. ضمنا در زمان انجام آزمایش‌ها، سرعت وزش باد ناچیز بوده و هوا بسیار آرام بود.

دانه‌های زیره سبز به صورت لایه نازک(۱۰میلی متر) در دو حالت فعال (با سه دبی متفاوت هوای خشک‌کننده) و غیرفعال(جابه جایی آزاد هوا) با خشک‌کن خورشیدی کابینتی خشک شدند. دبی هوای خشک‌کننده در حالت فعال عبارت بودند از: {۰/۰۸۴ (f_2)،۰/۱۲۷ (f_3) و ۰/۱۵۵ (f_4) متر مکعب برثانیه}. رطوبت اولیه محصول ۴۳/۵ درصد (بر پایه خشک) بوده و قرار بود محصول تا رطوبت نهایی میانگین ۸ درصد خشک شود. زمان خشک کردن برای همه حالت‌ها ثابت نگه داشته شد(۹۰ دقیقه) و بنابراین رطوبت نهایی محصول به نرخ هوای عبوری و حالت خشک‌کن بستگی داشت.

برای بررسی اثر دبی هوا و نحوه خشک کردن بر درصد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]

رطوبت محصول از آزمایش فاکتوریل با سه تکرار در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی استفاده شد. از آنجایی که سطح مقطع خروجی هوا ۰/۰۷۶ مترمربع بود، لذا دبی هوای خشک‌کننده با ضرب کردن سرعت هوای خشک‌کننده (متر بر ثانیه) در این سطح مقطع به دست می‌آید. در زیر دبی‌های متفاوت هوا به همراه سرعت‌های معادل آن بر حسب متر بر ثانیه آورده شده است.

$F(f_1, f_2, f_3, f_4)$: دبی هوای خشک‌کننده در چهار سطح (بر حسب مترمکعب بر ثانیه)

f_1= حالت غیرفعال

f_2 = ۰/۰۸۴(m^3/s)~۱/۱۶m/s

f_3 = ۰/۱۲۷ (m^3/s) ~۱/۷۴m/s

f_4 = ۰/۱۵۵ (m^3/s) ~۲/۱۲m/s

$Z(z_1,z_2)$: نحوه خشک کردن

z_1: خشک کردن به صورت مختلط

z_2: خشک کردن به صورت تابش غیرمستقیم

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مربوط به بررسی اثر جریان هوا و نحوه خشک شدن در جدول۱ نشان داده شده است. از این جدول چنین استنباط می‌شود که دبی هوا و نحوه خشک شدن، اثر معنی‌داری بردرصد رطوبت محصول در هر زمان خشک شدن دارد.

با توجه به جدول۲ سطوح مختلف دبی هوای خشک‌کننده اثر معنی‌داری بر میانگین درصد رطوبت خشک شدن داشته و با افزایش دبی هوای خشک‌کننده میانگین‌های درصد رطوبت و در نتیجه مدت زمان لازم برای خشک کردن افزایش می‌یابد. علت این امر کاهش دمای هوای خشک‌کننده، متناسب با افزایش دبی هوای خارج شده از جمع کننده می‌باشد. این کاهش متعاقبا موجب کاهش ضریب انتشار رطوبت (Coefficient of moisture diffusion) در محصول می‌گردد. از این جدول هم‌چنین نتیجه گرفته می‌شود نحوه خشک کردن اثر معنی‌داری بر مدت زمان خشک شدن دارد. در روش مختلط به دلیل بهره‌گیری از تابش مستقیم نور خورشید مدت زمان کمتری برای خشک شدن محصول به رطوبت ۸ درصد صرف می‌گردد. نتایج تجزیه واریانس با نتایج کار مشابهی که روی محصول انگور در سال ۱۳۸۵در بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شیراز توسط داداش زاده انجام گرفت، مطابقت کامل دارد (۱). با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌های جداول ۱و ۲، بهترین حالت خشک شدن زیره سبز از لحاظ مدت زمان خشک شدن، حالتی است که از خشک‌کن مختلط و با کمترین جریان هوای خشک‌کننده (جابه‌جایی آزاد) استفاده گردد. زیرا زمانی که دبی حجمی جریان عبوری هوا از جمع کننده به حداقل می‌رسد، درجه حرارت وارد شده به خشک‌کن حداکثر است. ضمن این که در این حالت محصول به صورت مستقیم انرژی تابشی دریافت می‌کند. بنابراین حداقل زمان خشک شدن در این حالت اتفاق خواهد افتاد.

نمودار تغییر رطوبت دانه زیره سبز در طول مدت زمان خشک شدن در دو حالت مختلط و غیر مستقیم برای حالتی که جریان هوای خشک‌کننده، جابه‌جایی آزاد است(غیرفعال) در نمودار ۱ نمایش داده شده است.

همان‌گونه که از این نمودارها برمی‌آید نرخ خشک شدن در هر دو حالت مختلط و غیر مستقیم نزولی است. نرخ خشک شدن در حالت مختلط نسبت به حالت غیر مستقیم سریع‌تر است. این احتمالاً از آن رو است که در حالت مختلط به دلیل اثر تابش مستقیم نور خورشید، درجه حرارت هوای خشک‌کننده بالاتر است.

نمودار ۲ نیز تغییرات رطوبت محصول را در حالتی که دبی هوای عبوری از روی محصول برابر ۰/۰۸۴متر مکعب بر ثانیه است، نشان می‌دهد. در اینجا نیز نرخ خشک شدن در هر حالت خشک شدن نزولی بوده و این نرخ در حالت مختلط نسبت به حالت غیر مستقیم دارای شیب بیشتری است.

نمودار ۳ و ۴ نیز تغییرات رطوبت محصول را به ترتیب در دبی هوای ۰/۱۲۷ و ۰/۱۵۵متر مکعب بر ثانیه نشان می‌دهد.

از مقایسه نمودارهای ۱ تا ۴ چنین برمی‌آید که نمودار

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]

جدول۱. تجزیه واریانس اثرهای اصلی و متقابل دبی هوا و نحوه خشک کردن بر درصد رطوبت زیره سبز

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	Fs
تکرار	۲	۳/۲	۱/۶	۰/۹۲^{ns}
دبی هواF	۳	۹۶/۸	۳۲/۲۶۶	۱۸/۶**
نحوه خشک کردنZ	۱	۳۲۵/۲	۳۲۵/۲	۱۸۷/۴**
برهمکنشFZ	۳	۲/۴	۰/۸	۰/۴۶۱^{ns}
خطای آزمایش	۱۴	۲۴/۳	۱/۷۳۵	
مجموع	۲۳	۴۵۱/۹		

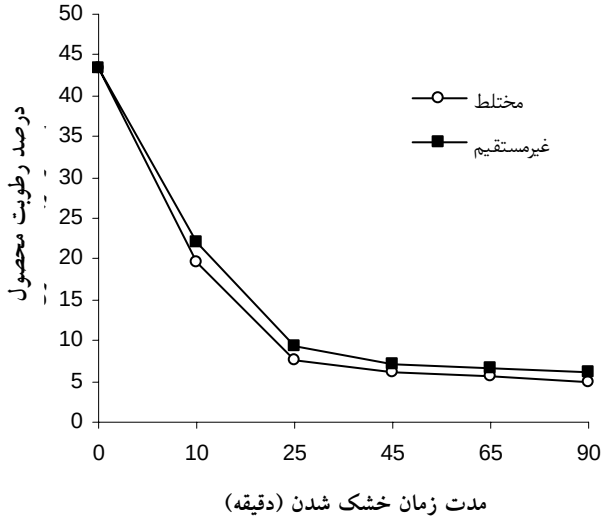
** : نشانگر معنی‌دار بودن آزمون در سطح ۹۹درصد

^{ns} : نشانگر معنی‌دار نبودن آن است.

جدول۲. مقایسه میانگین‌های درصد رطوبت زیره در سطوح مختلف دبی هوا و نحوه خشک شدن

دبی هوا(F) / نحوه خشک کردن(Z)	f_1(مکنده خاموش)	f_2	f_3	f_4	میانگین
z_1	۱۲/۴^{g}	۱۳/۱۸^{e}	۱۴/۴۳^{d}	۱۶/۴۶^{b}	۱۴/۱۷۵^{C}
z_2	۱۳/۹^{f}	۱۴/۳^{d}	۱۵/۵^{c}	۱۸/۲^{a}	۱۵/۴۲۵^{B}
میانگین	۱۳/۰۵^{E}	۱۳/۷۴^{D}	۱۴/۹۶۵^{B}	۱۷/۳۳^{A}	

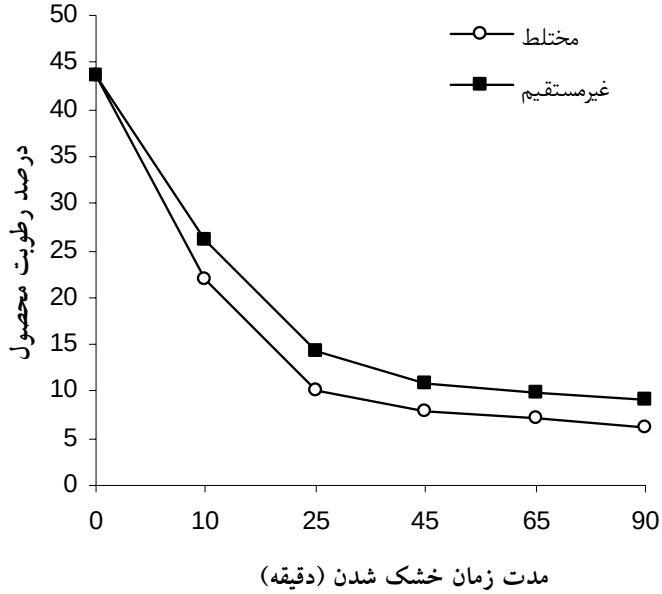
حروف متفاوت انگلیسی نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین اعداد در سطح ۹۵ درصد است.



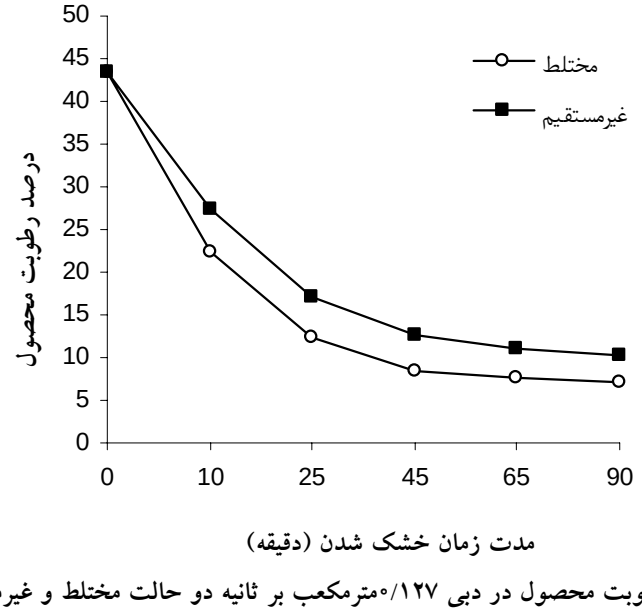
نمودار۱. تغییرات رطوبت محصول در حالت فن خاموش (غیرفعال) برای دو حالت مختلط و غیرمستقیم

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]



نمودار۲. تغییرات رطوبت محصول در دبی۰/۰۸۴ مترمکعب بر ثانیه برای دو حالت مختلط و غیرمستقیم



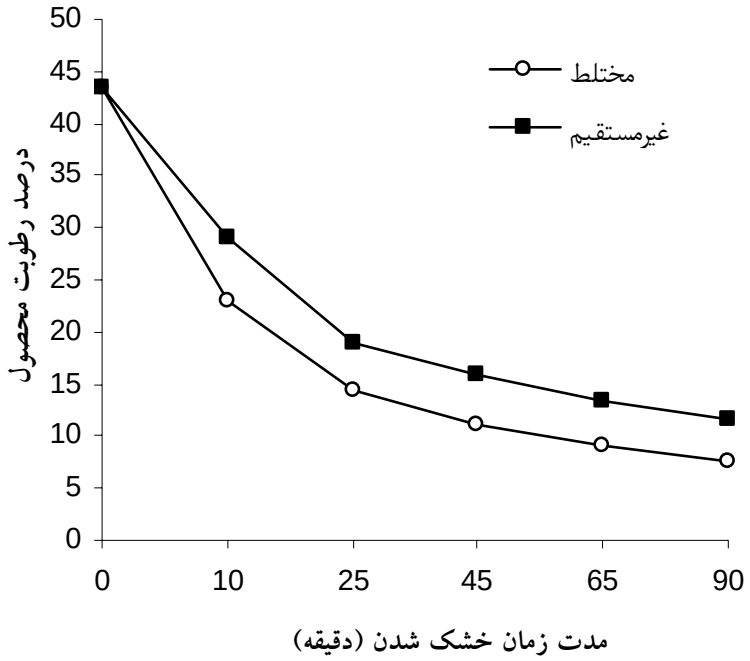
نمودار۳. تغییرات رطوبت محصول در دبی ۰/۱۲۷مترمکعب بر ثانیه دو حالت مختلط و غیرمستقیم

خشک شدن در دو حالت مختلط و غیر مستقیم در دبی‌های پایین هوای خشک‌کننده نزدیک به هم می‌باشند ولی با افزایش دبی هوا این منحنی‌ها در دوحالت از هم فاصله می‌گیرند. دلیل آن را می‌توان چنین بیان کرد که در دبی‌های پایین به علت بالا بودن دمای هوای خروجی از جمع کننده، نقش تابش مستقیم خورشید (حالت مختلط) در خشک کردن به نسبت کمتر از زمانی است که دبی هوا زیاد است. زیرا در این حالت دمای هوای خروجی از جمع کننده کمتر است. بنابر این در دبی‌های بالاتر دو نمودار در دو حالت مختلط و غیر مستقیم از همدیگر فاصله بیشتری می‌گیرند.

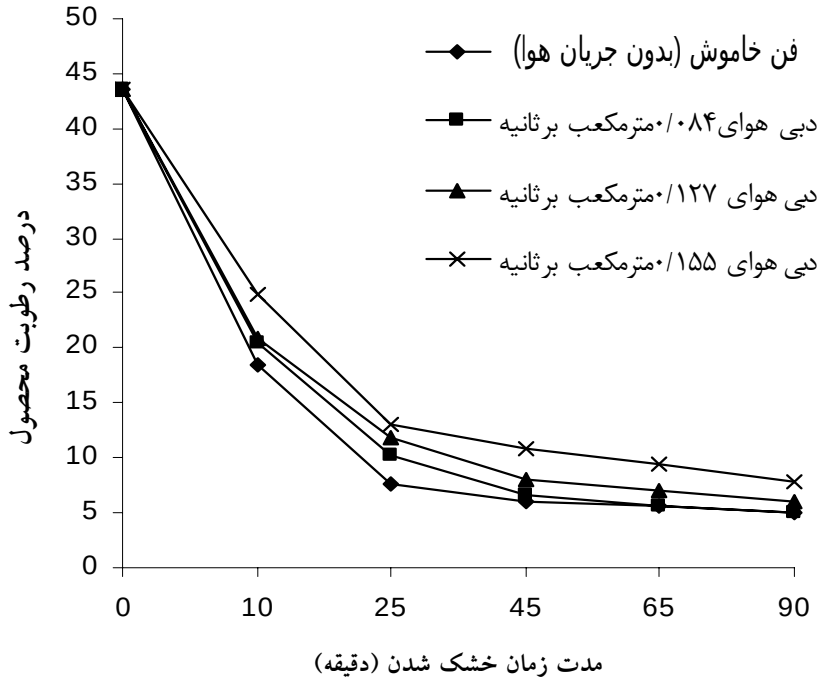
در نمودار ۵ نرخ خشک شدن در حالت مختلط در چهار جریان متفاوت هوا نشان داده شده است. از این نمودار چنین بر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]



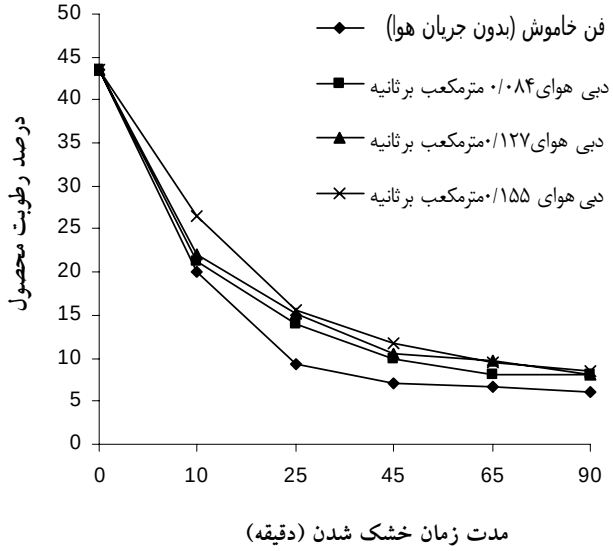
نمودار۴. تغییرات رطوبت محصول در دبی۰/۱۵۵مترمکعب بر ثانیه دو حالت مختلط و غیرمستقیم



نمودار۵. تییرات رطوبت محصول در مقابل مدت زمان خشک شدن در حالتی که از خشک کن به صورت مختلط استفاده می‌گردد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]



نمودار۶. تغییرات رطوبت محصول در مقابل مدت زمان خشک شدن در حالتی که از خشک کن به صورت غیرمستقیم استفاده می گردد.

می‌آید که با افزایش دبی هوای خشک‌کننده نرخ خشک شدن زیره سبز کمتر می‌شود که می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش سرعت هوای عبوری از روی جمع کننده خورشیدی انتقال گرما از جمع‌کننده به هوای عبوری کمتر شده که نهایتاً موجب کمتر شدن دمای هوای خشک‌کننده می‌شود. این در مورد تابش غیر مستقیم که در شکل ۶ نشان داده شده است نیزصادق است.

حالت جابه‌جایی آزاد به شکل مختلط نسبت به بیشترین دبی هوای خشک‌کننده در حالت غیرمستقیم (کمترین سرعت خشک شدن) حدود ۳۸ درصد کاهش زمان خشک شدن را در پی داشته است.

نتیجه‌گیری

به منظور تعیین نرخ خشک شدن و بهترین حالت خشک شدن لایه نازک زیره سبز از دستگاه خشک‌کن خورشیدی در حالت تابش غیر مستقیم و مختلط با چهار دبی متفاوت هوای خشک‌کننده استفاده گردید. در نهایت کمترین دبی هوای خشک‌کننده(جابه جایی آزاد) به عنوان بهترین حالت خشک شدن زیره سبز از لحاظ مدت زمان خشک شدن انتخاب گردید که نسبت به بیشترین دبی هوای خشک‌کننده در حالت غیر مستقیم (کمترین سرعت خشک شدن) حدود ۳۸ درصد کاهش زمان خشک شدن را در پی داشته است.

منابع مورد استفاده

۱. داداش زاده، م. ۱۳۸۵. طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن خورشیدی برای انگور. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۲. زمردیان، ع. و ع. علامه. ۱۳۸۱. بررسی خشک شدن شلتوک به روش لایه نازک و تعیین ضخامت بهینه با به کارگیری یک خشک‌کن خورشیدی آزمایشگاهی با جریان جابه‌جایی آزاد. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۶(۴): ۲۰۹-۲۱۷.

۳. کافی، م. ۱۳۸۳. *فناوری و تولید زیره سبز (قطب علمی زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد)*. نشر زبان و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]

ادب، تهران.

4. AOAC. (1990). Official method of analysis. Association of Official Analytical Chemists, (No. 934.06), Washington, DC.
5. Bala, B.K. and J.L. Woods. 1994. Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. Solar Energy 53: 259–266.
6. Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall. 1992. Drying and Storage of Oilseeds. The AVI Pub. Co., New York.
7. Duffie, J. A. and W. A. Beckman. 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd ed., John Wiley and Sons Inc., New York, USA.
8. Miramare, T. 1997. Design and measured performance of a solar chimney for natural-circulation solar-energy dryers. Renew Energy 10(1):81–90.
9. Yaldiz, O. and C. Ertekin. 2001. Thin layer drying of some vegetable. Drying Technol. 19(3&4): 583–597.
10. Simate, I.N. 2001. Simulation of the mixed-mode natural-convection solar drying of maize, Drying Technology 19(6): 1137–1155.
11. Zaman, M.A. and B.K. Bala. 1989. Thin layer solar drying of rough rice. Solar Energy 42: 167–171.
12. Zomorodian, A., D. Zare and H. Ghasemkhani. 2007. Optimization and evaluation of a semi-continuous solar dryer for cereals (Rice, etc). Desalination 209: 129-135.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.48.17.7]