

بررسی سینتیک خشک شدن زیره سبز در یک خشک کن 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 خشک کن خورشیدی کابینتی برای خشک کردن لایه نازک زیره سبز در دو حالت مختلف خشک شدن (مختلط و غیر مستقیم) و چهار جریان متفاوت هوای خشک کننده (سه جریان فعال و یک جریان غیرفعال) استفاده گردید. هر کدام از آزمایش ها در سه تکرار و در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی انجام گرفت. مقدار رطوبت زیره سبز در هر زمان نمونه برداری در طول زمان یکسان خشک شدن (۹۰ دقیقه برای همه آزمایش ها) برای این آزمایش ها مورد ارزیابی قرار گرفت. متوسط رطوبت اولیه دانه های زیره سبز ۴۳/۵ درصد بر پایه خشک بوده و قرار بود نمونه ها به مدت ۹۰ دقیقه داخل دستگاه قرار داده شوند تا خشک گردند (متوسط ۸ درصد بر پایه خشک). دو فاکتور جریان هوای خشک کننده و حالت خشک شدن اثر معنی داری بر این درصد رطوبت داشت. بر اساس مقایسه میانگین های مقدار رطوبت محصول به وسیله آزمون چند دامنه ای دانکن خشک کردن با جریان هوای خشک کننده با جابه جایی 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 ۲۰ درصد بود. استفاده از دستگاه خشک کن خورشیدی در حالت تابش مختلط با جریان جابه جایی آزاد هوای خشک کننده موجب شد که درصد رطوبت زیره سبز در مدت ۹۰ دقیقه از ۴۳/۵ درصد به ۴/۹۵ درصد (بر پایه خشک) برسد.

واژه های کلیدی: خشک کردن خورشیدی، زیره سبز

مقدمه

خشک کردن انرژی زیادی به مصرف می رساند. در ایالت های مرکزی آمریکا حدود ۶۰ درصد کل انرژی مورد نیاز در عمل خشک کردن ذرت دانه ای مصرف می شود (۶). خشک کردن آفتابی پرکاربردترین روش برای استفاده در محصولات کشاورزی مخصوصاً در کشورهای آسیایی است. در این روش محصولات روی یک سطح صاف و بزرگ پخش

در میان مراحل مختلف آماده سازی مواد غذایی برای خشک کردن یکی از مهم ترین فعالیت ها، کاهش رطوبت آن است که اگر به طور صحیح انجام نگیرد، می تواند باعث افت کیفی و کمی محسوس محصول گردد (۱۲). در مقایسه با سایر فعالیت ها جهت نگه داری مواد غذایی،

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

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

شده و انرژی خورشید به طور مستقیم توسط محصول جذب می‌گردد. 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). عموماً 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 جمع‌کننده 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 جمع‌کننده 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 ۲۰-۱۵ گرم 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 حدود ۵۰۰۰۰ هکتار بوده که از این سطح، حدود ۱۵۰۰۰ 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 و ۱۱).

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 جابه‌جایی آزاد (طبیعی) بود. آزمایش‌ها در سه عمق بستر ۲، ۴ و 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 ۴ و ۶ 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

مدخل ورودی هوا به جمع کننده خورشیدی و سه عدد در مدخل ورودی هوا به اتاقک خشک کن (محفظه آرام کننده خشک کن) و دو تئای دیگر در قسمت خروجی هوا از خشک کن نصب شدند. اندازه گیری دما در هر ۵ دقیقه انجام گرفت. شدت نور خورشید نیز مرتباً و در هر ۵ دقیقه به وسیله نورسنج خورشید (Thermistor) (سیلیکونی) اندازه گیری شد و در کامپیوتر ثبت گردید. این دستگاه در کنار خشک کن خورشیدی و جمع کننده و مانند آن تحت زاویه ۴۵ درجه قرار داده شد. نورسنج مورد استفاده در این طرح میزان تابش دهی کل را بر حسب وات بر متر مربع اندازه گیری می کرد. میزان رطوبت دانه ها توسط دستگاه آون الکتریکی در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۶ ساعت به دست آورده شد (۴).

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

در این تحقیق از یک دستگاه خشک کن خورشیدی کابینتی مطابق شکل ۱ استفاده شد. این دستگاه شامل یک جمع کننده خورشیدی تخت به ابعاد ۱/۵×۰/۵ متر، یک اتاقک خشک کن به شکل دوزنقه به ارتفاع ۴۲۰ میلی متر، قاعده بزرگ ۵۳۰، قاعده کوچک ۳۳۰ میلی متر و عرض ۵۰ میلی متر (شکل ۱) و یک سینی به ابعاد ۳۳۰×۲۲۰ میلی متر جهت نگه داری محصول بود. دانه ها به صورت لایه ای نازک روی سینی به طور یکنواخت پهن می شدند. سینی حاوی محصول در داخل اتاقک خشک کن قرار داده می شد. هوا از درون جمع کننده خورشیدی که روی آن یک شیشه شفاف بود، مکیده می شد. سپس هوا از زیر سینی حاوی محصول عبور کرده و موجب انتقال حرارت به دانه های زیره سبز و نهایتاً خشک شدن آن می شد. در حالت فعال، فن مکنده روشن ولی در حالت غیر فعال آزمایش ها در حالت فن خاموش صورت می گرفت و هوا به طور آزاد از سیستم خشک کن عبور می کرد.

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

خشک شدن از سه جریان مختلف هوا استفاده شد و هم چنین مقداری از محصول به صورت طبیعی خشک شد. سرعت خشک شدن به شکل معنی داری تحت تأثیر سرعت هوای خشک کننده 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 نمونه ها در حالت خشک شدن طبیعی زیر نور خورشید در فضای باز سرعت خشک شدن افزایش یافت. آنها هم چنین برای محصولات مختلف رابطه ای برای پیش بینی نسبت رطوبت در زمان های مختلف با توجه به سرعت هوا ارائه کردند (۹).

هدف از انجام پژوهش حاضر به دست آوردن نرخ خشک شدن زیره سبز در حالت های 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 روش ها

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

محصول با دست تمیز شده و در طول ۲۴ روز مدت آزمایش در یخچال تحت دمای ۴ درجه سلسیوس نگه داری شد. رطوبت اولیه دانه ها ۴۳/۵ درصد (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 ۳۰ درجه است این زاویه ۴۵ درجه انتخاب گردید (۷).

دمای هوا به وسیله سنسورهای حرارتی (Thermistor) (SMT - 160) (۷ عدد) در قسمت های مختلف دستگاه خشک کن اندازه گیری شد. دقت این حسگرها ۰/۵°C بوده و دما توسط سیستم پردازش داده ها (Data acquisition system) در کامپیوتر نمایش داده و ذخیره شد. دو عدد از حسگرها در



شکل ۱. خشک کن خورشیدی مورد استفاده در طرح

۱۱:۳۰ شروع شده و تا ساعت ابعداً از ظهر ادامه می‌یافت. متوسط شدت تابش انرژی خورشیدی در زمان آزمایشات ۷۵۰ وات بر متر مربع، متوسط درجه حرارت محیط ۳۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی محیط ۲۰ درصد بود. ضمناً در زمان انجام آزمایش‌ها، سرعت وزش باد ناچیز بوده و هوا بسیار آرام بود.

دانه‌های زیره سبز به صورت لایه نازک (۱۰ میلی‌متر) در دو حالت فعال (با سه دبی متفاوت هوای خشک‌کننده) و غیرفعال (جابه‌جایی آزاد هوا) با خشک‌کن خورشیدی کابینتی خشک شدند. دبی هوای خشک‌کننده در حالت فعال عبارت بودند از: $\{0.084 (f_2), 0.127 (f_3), 0.155 (f_4)\}$ متر مکعب بر ثانیه. 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

(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 چنداناً استفاده شد. این پارچه روی شیشه شفاف اتاقک خشک‌کن قرار داده شد (حالت غیر مستقیم).

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 اندازه‌گیری سرعت هوای خشک‌کننده از یک باد سنج توربینی (Solarimeter) (yk-2001AL) با دقت ۰/۱ متر 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

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 ۱۳۸۵ در بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شیراز توسط داداش زاده انجام گرفت، مطابقت کامل دارد (۱). با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌های جداول ۱ و 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 جمع‌کننده 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 0.084 متر 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 0.127 و 0.155 متر مکعب بر ثانیه نشان می‌دهد. از مقایسه نمودارهای ۱ تا ۴ چنین برمی‌آید که نمودار

رطوبت محصول از آزمایش فاکتوریل با سه تکرار در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی استفاده شد. از آنجایی که سطح مقطع خروجی هوا 0.076 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)

حالت غیرفعال $f_1 =$

$$f_2 = 0.084 (m^3/s) \sim 1.16 m/s$$

$$f_3 = 0.127 (m^3/s) \sim 1.74 m/s$$

$$f_4 = 0.155 (m^3/s) \sim 2.12 m/s$$

$Z(Z_1, Z_2)$: 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 جدول ۱ نشان داده شده است. از این جدول چنین استنباط می‌شود که دبی هوا و نحوه خشک شدن، اثر معنی‌داری بر درصد رطوبت محصول در هر زمان خشک شدن دارد.

با توجه به جدول ۲ 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 جمع‌کننده می‌باشد. این کاهش متعاقباً 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

جدول ۱. تجزیه واریانس اثرهای اصلی و متقابل دبی هوا و نحوه خشک کردن بر درصد رطوبت زیره سبز

| Fs | میانگین مربعات | مجموع مربعات | درجه آزادی | منابع تغییرات |
|---------------------|----------------|--------------|------------|-----------------|
| ۰/۹۲ ^{NS} | ۱/۶ | ۳/۲ | ۲ | تکرار |
| ۱۸/۶ ^{**} | ۳۲/۲۶۶ | ۹۶/۸ | ۳ | دبی هوا F1 |
| ۱۸۷/۴ ^{**} | ۳۲۵/۲ | ۳۲۵/۲ | ۱ | نحوه خشک کردن Z |
| ۰/۴۶۱ ^{NS} | ۰/۸ | ۲/۴ | ۳ | برهمکنش FZ |
| | ۱/۷۳۵ | ۲۴/۳ | ۱۴ | خطای آزمایش |
| | | ۴۵۱/۹ | ۲۳ | مجموع |

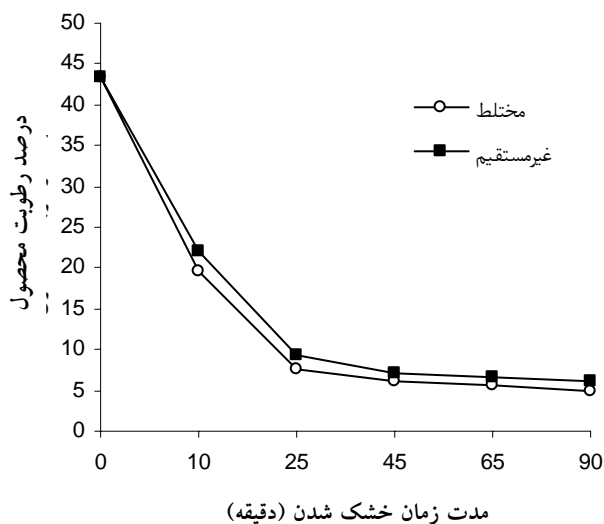
** : نشانگر معنی دار بودن آزمون در سطح ۹۹ درصد

^{NS} : نشانگر معنی دار نبودن آن است.

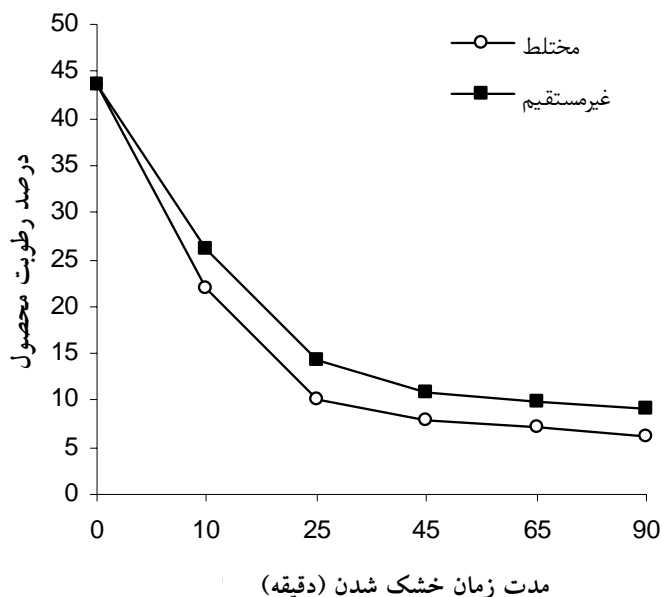
جدول ۲. مقایسه میانگین‌های درصد رطوبت زیره در سطوح مختلف دبی هوا و نحوه خشک شدن

| میانگین | f ₄ | f ₃ | f ₂ | f ₁ (مکنده خاموش) | دبی هوا (F) |
|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|-------------------|
| | | | | | نحوه خشک کردن (Z) |
| ۱۴/۱۷۵ ^C | ۱۶/۴۶ ^b | ۱۴/۴۳ ^d | ۱۳/۱۸ ^e | ۱۲/۴ ^g | Z ₁ |
| ۱۵/۴۲۵ ^B | ۱۸/۲ ^a | ۱۵/۵ ^c | ۱۴/۳ ^d | ۱۳/۹ ^f | Z ₂ |
| | ۱۷/۳۳ ^A | ۱۴/۹۶۵ ^B | ۱۳/۷۴ ^D | ۱۳/۰۵ ^E | میانگین |

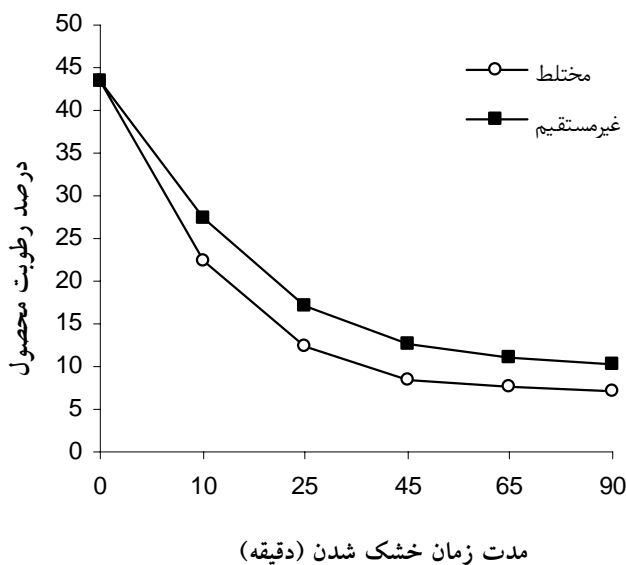
حروف متفاوت انگلیسی نشان‌دهنده اختلاف معنی دار بین اعداد در سطح ۹۵ درصد است.



نمودار ۱. تغییرات رطوبت محصول در حالت فن خاموش (غیرفعال) برای دو حالت مختلط و غیرمستقیم



نمودار ۲. تغییرات رطوبت محصول در دبی ۰/۸۴ مترمکعب بر ثانیه برای دو حالت مختلط و غیرمستقیم

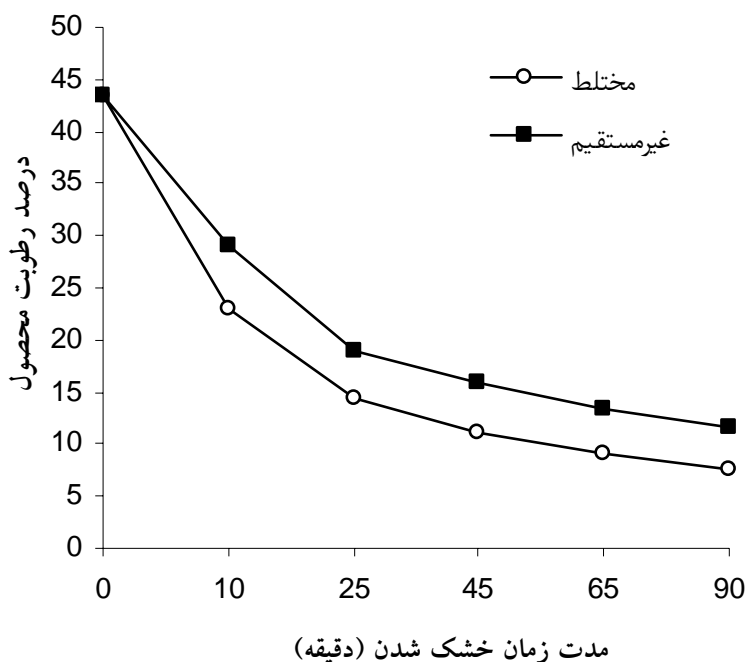


نمودار ۳. تغییرات رطوبت محصول در دبی ۰/۱۲۷ مترمکعب بر ثانیه برای دو حالت مختلط و غیرمستقیم

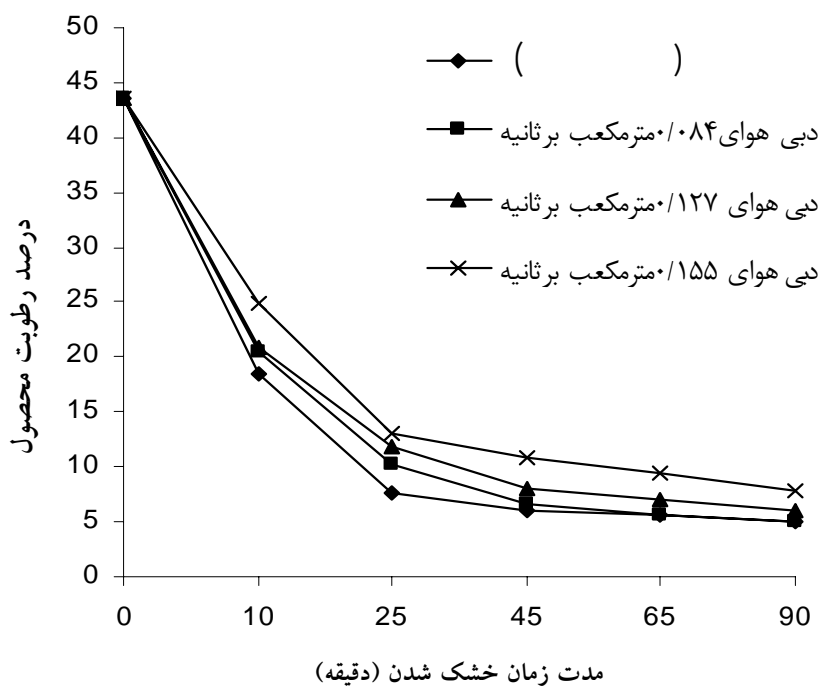
زمانی است که دبی هوا زیاد است. زیرا در این حالت دمای هوای خروجی از جمع کننده کمتر است. بنابر این در دبی‌های بالاتر دو نمودار در دو حالت مختلط و غیر مستقیم از همدیگر فاصله بیشتری می‌گیرند.

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

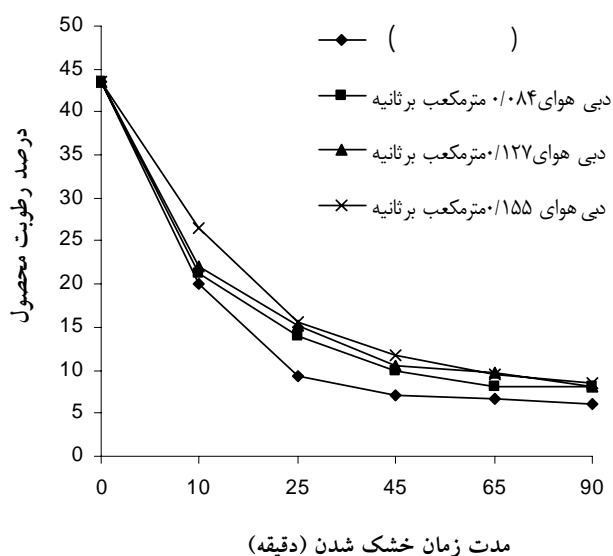
خشک شدن در دو حالت مختلط و غیر مستقیم در دبی‌های پایین هوای خشک‌کننده نزدیک به هم می‌باشند ولی با افزایش دبی هوا این منحنی‌ها در دو حالت از هم فاصله می‌گیرند. دلیل آن را می‌توان چنین بیان کرد که در دبی‌های پایین به علت بالا بودن دمای هوای خروجی از جمع کننده، نقش تابش مستقیم خورشید (حالت مختلط) در خشک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



نمودار ۴. تغییرات رطوبت محصول در دبی ۰/۱۵۵ مترمکعب بر ثانیه دو حالت مختلط و غیرمستقیم



نمودار ۵. تغییرات رطوبت محصول در مقابل مدت زمان خشک شدن در حالتی که از خشک کن به صورت مختلط استفاده می‌گردد.



نمودار ۶: تغییرات رطوبت محصول در مقابل مدت زمان خشک شدن در حالتی که از خشک کن به صورت غیرمستقیم استفاده می گردد.

نتیجه گیری

به منظور تعیین نرخ خشک شدن و بهترین حالت خشک شدن لایه نازک زیره سبز از دستگاه خشک کن خورشیدی در حالت تابش غیر مستقیم و مختلط با چهار دبی متفاوت هوای خشک کننده استفاده گردید. در نهایت کمترین دبی هوای خشک کننده (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 خشک کننده در حالت غیر مستقیم (کمترین سرعت خشک شدن) حدود ۳۸ درصد کاهش زمان خشک شدن را در پی داشته است.

می آید که با افزایش دبی هوای خشک کننده نرخ خشک شدن زیره سبز کمتر می شود که می تواند به این دلیل باشد که با افزایش سرعت هوای عبوری از روی جمع کننده خورشیدی انتقال گرما از جمع کننده به هوای عبوری کمتر شده که نهایتاً موجب کمتر شدن دمای هوای خشک کننده می شود. این در مورد تابش غیر مستقیم که در شکل ۶ نشان داده شده است نیز صادق است.

حالت جابه جایی آزاد به شکل مختلط نسبت به بیشترین دبی هوای خشک کننده در حالت غیرمستقیم (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 خشک کن خورشیدی برای انگور. پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های 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 خشک کن خورشیدی آزمایشگاهی با جریان جابه جایی 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

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.