

فرایند خشک کردن برگ های به لیمو در یک خشک کن خورشیدی: تحلیل انرژی و اکسرژی

مهدی مرادی^{۱*}، جاوید قاسمی ابنوی^۲

۱- استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز-شیراز-ایران (moradih@shirazu.ac.ir)

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز-شیراز-ایران (ghasemijavid@yahoo.com)

چکیده

یک خشک کن خورشیدی کابینتی به منظور بررسی راندمان انرژی فرایند خشک شدن برگ های به لیمو مورد استفاده قرار گرفت. این خشک کن دارای یک صفحه جمع کننده تخت به رنگ تیره بود که تحت زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح افق نصب شد. با دمیدن هوا توسط یک دمنده ساتریفوژ به روی این صفحه گرم شده با انرژی خورشید، هوای خشک کننده گرم شده و با ورود به داخل کابینت خشک کن حاوی سینی محصول، برگ های به لیمو خشک می شدند. به منظور ارزیابی دستگاه مذکور، سه سطح مختلف دمای هوای خشک کننده (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس) و سه سطح سرعت هوای خشک کننده (۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه) اعمال گردید. حسگرهایی در نقاط مختلف دستگاه نصب شد تا دما و رطوبت را به صورت لحظه ای در پردازنده مرکزی ذخیره سازی کند. با استفاده از این اطلاعات، تحلیل انرژی و اکسرژی انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دما و کاهش سرعت، مقدار نسبت مصرف انرژی کاهش می یابد به گونه ای که بیشترین نسبت مصرف انرژی در آزمایش با دمای ۳۰ درجه سلسیوس و سرعت ۳ متر بر ثانیه بدست آمد. همچنین بیشترین مقدار بازدهی اکسرژی در سرعت ۳ متر بر ثانیه و دمای ۵۰ درجه سلسیوس مشاهده شد.

کلمات کلیدی:

انرژی ویژه خشک کردن، نسبت مصرف انرژی، دی اکسید کربن، منابع انرژی تجدیدپذیر

*نویسنده مسئول



سیزدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک

بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

(مکانیک بیوسیستم ۱۴۰۰)

۲۴-۲۶ شهریور ۱۴۰۰



مقدمه

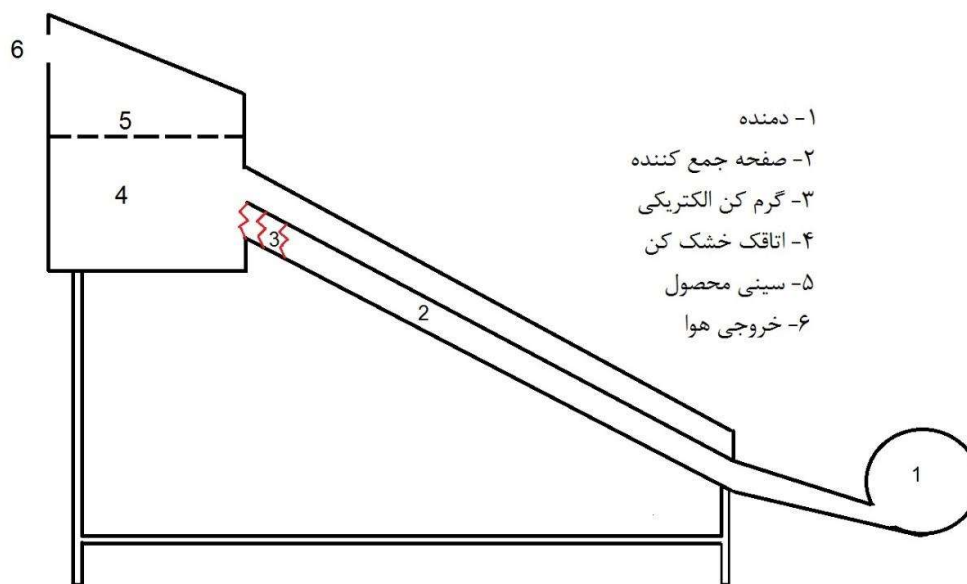
گیاه دارویی به لیمو (*Aloysia citrifolia*) درختچه‌ای با ارتفاع ۲-۱/۵ متر که بومی آرژانتین بوده و دارای برگ‌های ساده سرسبزهای به طول ۱۰-۷ سانتی متر می‌باشد. برگ‌ها و پیکر رویشی تازه‌ی این گیاه دارای اسانس معطری مشابه بوی لیمو است. این اسانس سبک‌تر از آب بوده، رنگ آن زرد متمایل به سبز روشن است و از آنجایی که عطر بسیار دلنشینی دارد همیشه به‌عنوان گیاهی معطر در باغ‌های سلطنتی اسپانیا کشت می‌شده است. رطوبت این گیاه در زمان برداشت، حدود ۲۴۰ درصد (بر مبنای خشک) است. در صورتیکه به لیمو با همین رطوبت ذخیره شود، دچار فساد خواهد شد. از این رو رطوبت گیاه را با استفاده از فرآیند خشک کردن تا حدود ۱۰ درصد (بر مبنای خشک) کاهش می‌دهند. این عمل به طور معمول با استفاده از روش سنتی سایه خشک انجام می‌شود. بدلیل بروز تغییرات نامطلوب در کیفیت محصول و همچنین احتمال حمله آفات و حشرات و پرندگان با توجه به طولانی بودن زمان خشک شدن، استفاده از روش‌های صنعتی برای خشک کردن محصول، ضروری به نظر می‌رسد [۳].

امروزه انرژی به عنوان یکی از مهمترین منابع مورد استفاده بشر، مطرح می‌باشد که محدود بودن منابع آن در آینده نه چندان دور ممکن است معضلاتی را در خصوص روشهای دسترسی به این منابع ایجاد کند [۱۷]. انرژی به شکلهای مختلفی در صنایع کاربرد دارد که یکی از مرسوم ترین انواع آن، انرژی گرمایی است که جهت تامین آن هزینه بسیار زیادی باید صرف شود. یکی از کاربردهای اصلی انرژی گرمایی، استفاده از آن برای خشک کردن مواد غذایی می‌باشد [۱۴]. منبع اصلی انرژی مورد استفاده در خشک‌کن‌های صنعتی، سوخت‌های فسیلی است که این سوخت‌ها مهمترین منبع انرژی جهان را تشکیل می‌دهند. متأسفانه سوخت‌های فسیلی تجدیدنپذیر بوده و تا دهه‌های آینده در ایران و بیشتر مناطق دنیا تمام خواهند شد. همچنین این سوخت‌ها، عامل اصلی مشکلات زیست محیطی دنیا از جمله آلودگی‌های جوی و گرم شدن کره‌ی زمین می‌باشند. از طرفی مقدار انرژی که توسط خورشید در عرض یک ساعت به کره‌ی زمین می‌رسد برای مصارف کل انرژی یک سال کفایت می‌کند [۱۷]. از اینرو استفاده از خشک‌کن‌هایی که از سوخت‌هایی غیر از سوخت فسیلی استفاده می‌کنند، علاوه بر صرفه جویی در مصرف انرژی کمک شایانی به حفاظت از محیط زیست می‌کند [۱۵ و ۱۶]. محققین زیادی تحقیقات مختلفی را در خصوص کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی انجام داده‌اند [۱۱ و ۱۵ و ۱۸].

در یک تحقیق انرژی خورشیدی به منظور خشک کردن دانه‌های زیره سبز در یک خشک‌کن خورشیدی استفاده گردید. آنها سه سرعت برای هوای خشک‌کننده در نظر گرفتند. نتایج تحقیقات مزبور نشان داد که با افزایش سرعت هوای خشک‌کننده نرخ خشک شدن دانه‌های زیره نیز کاهش یابد [۴]. در یک تحقیق دیگر یک خشک‌کن چرخشی آب گرم که با انرژی خورشید کار می‌کند، ساخته شده است. این خشک‌کن دارای یک جمع‌کننده خورشیدی است که آب با چرخش در اطراف آن، گرم شده و با ارسال آب گرم شده به رادیاتور که در داخل محفظه خشک‌کن قرار دارد، فرایند خشک کردن انجام می‌شود [۱۱]. خشک‌کن‌های هوای گرم معمولاً در دو نوع غیر مستقیم و مختلط موجود هستند. در نوع مختلط، محصول علاوه بر هوای گرم، در معرض تابش مستقیم خورشید نیز قرار می‌گیرد. هر چند که استفاده از تابش مستقیم نور خورشید ممکن است به محصولات دارویی که دارای مقادیر فراوانی اسانس هستند، آسیب بزند [۲]. حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد از هزینه‌های تولید گیاهان دارویی صرف فرایند خشک کردن آنها می‌شود [۴]. همچنین از آنجایی که خشک‌کن‌های مرسوم، از منابع انرژی تجدیدنپذیر استفاده می‌کنند، کاربرد آنها علاوه بر از دست دادن مقادیر زیادی از سوخت‌های فسیلی منجر به تریق گازهای گلخانه‌ای به جو و ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود. استفاده از خشک‌کن‌هایی مانند خشک‌کن‌های خورشیدی که می‌توانند علاوه بر کاهش هزینه‌های خشک کردن به حفظ محیط زیست کمک کنند، می‌تواند در رفع این گونه مشکلات موثر باشد. از اینرو تحقیق حاضر به منظور بررسی و تحلیل انرژی و اکسرژی خشک کردن برگ‌های به لیمو در یک خشک‌کن خورشیدی لایه نازک انجام گرفته است [۱۱ و ۱۵ و ۱۸].

مواد و روش‌ها

یک دستگاه خشک کن خورشیدی کابینتی به منظور بررسی انرژی مصرفی فرایند خشک کردن برگ های به لیمو مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). خشک کن خورشیدی مورد آزمایش از قسمت های اصلی زیر ساخته شده است: جمع کننده خورشیدی، اتافک خشک کن، سینی نگهداری محصول، سیستم تأمین هوا، و شاسی دستگاه.



شکل ۱- شماتیک خشک کن خورشیدی مورد استفاده در پژوهش حاضر

در این دستگاه از یک عدد کالکتور خورشیدی با سطح موثر 0.75 متر مربع استفاده گردید. این جمع کننده از نوع صفحه ای تخت می باشد که هوا فقط از زیر این صفحه عبور می کند و روی آن هوای محبوس وجود دارد (ارتفاع فضای محبوس 35 میلی متر است). جمع کننده از یک ورق گالوانیزه که دوبار با رنگ تیره مات رنگ آمیزی شده بود، تشکیل گردید. بر روی جمع کننده از یک شیشه ساختمانی به ضخامت 4 میلی متر بعنوان پوشش استفاده شد. به منظور کاهش اتلاف گرما، پشت و کناره های جمع کننده با دولایه از پشم شیشه معمولی به ضخامت 5 سانتی متر عایق بندی گردیده است. در جمع کننده، هوا از زیر صفحه جاذب عبور کرده (ضخامت این دریچه 20 میلی متر است) و از خروجی تعبیه شده در انتهای بالایی آن خارج می شود. ابعاد جمع کننده برابر 148×52 سانتی متر بوده و فاصله کف تا صفحه جاذب و فاصله شیشه تا صفحه جاذب 2 سانتی متر می باشد. قابل ذکر است جهت جلوگیری از هدررفت هوای گرم، در محل اتصالات از چسب چوب استفاده شد. کلیه قسمت های خارجی با دولایه پشم شیشه عایق بندی گردید. به منظور نگهداری جمع کننده و قرار دادن آن در موقعیت مناسب نسبت به خورشید و همچنین سهولت در حمل و نقل آن از یک شاسی سبک استفاده می شود. این شاسی از جنس نبشی آهنی شماره 4 است. همچنین جهت جابجایی آسان جمع کننده از چهار عدد چرخ در زیر شاسی استفاده شده است. ارتفاع شاسی از سطح زمین 123 سانتی متر است. داشتن زاویه مناسب این شاسی نسبت به سطح افق از مهمترین پارامترها در طراحی و ساخت دستگاه است. در این مورد برای تعیین زاویه شیب مناسب جمع کننده ها رابطه ای وجود دارد [۸]:

$$\alpha = 15 + \text{عرض جغرافیای محل}$$

که در این رابطه α زاویه شیب جمع کننده است.

از آنجایی که محل انجام آزمایش بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در باجگاه، 12 کیلومتری شیراز، می باشد و عرض جغرافیای این منطقه حدودا 30 درجه است، لذا زاویه شیب جمع کننده 45 درجه در نظر گرفته شد. فرآیند اصلی خشک کردن در محفظه خشک کن انجام می شود. هوای گرم شده توسط جمع کننده بوسیله یک دمنده به این قسمت هدایت می شود. در

این قسمت با عبور هوای گرم از بستر محصول، رطوبت موجود در آن تبخیر و به خارج هدایت خواهد شد. محفظه خشک کننده شامل درب جهت دسترسی به داخل محفظه، دریچه جهت اتصال به سیستم تأمین هوا، شیار جهت نگهداری سینی، قاب و عایق کاری است. بدنه از جنس تخته نئوپان می باشد. مانند سایر قسمت های دستگاه این قسمت نیز با پشم شیشه عایق بندی شده است.

در این خشک کن محصول به صورت لایه نازک خشک می شود. به منظور قرار دادن محصول به صورت لایه نازک در داخل محفظه خشک کن، از توری فلزی به ابعاد ۲۵۰×۳۵۰ میلی متر استفاده شده است که دارای روزنه هایی در ابعاد متفاوت می باشند. برای انجام هر آزمایش، مقدار ۲۵ گرم برگ گیاه به لیمو بر روی این سطح به صورت لایه نازک پخش می شود.

در این خشک کن هوای گرم شده توسط جمع کننده به وسیله یک فن دمنده سانتریفوژ که دارای یک موتور تک فاز با توان ۰/۷۵ اسب بخار و حداکثر سرعت دورانی ۱۴۰ دور بر دقیقه است، وارد دستگاه می شود. جهت تغییر دبی هوای خروجی از فن از یک دیمر استفاده شده است که با تنظیم دیمر دبی هوای خروجی از فن تغییر می کند.

به لیمو به صورت تازه و با رطوبت اولیه تقریبی ۲۴۴ درصد بر پایه وزن خشک از مزرعه گیاهان دارویی دانشکده کشاورزی واقع در باجگاه تهیه گردید. جهت جلوگیری از کم شدن رطوبت برگ به لیمو قبل از قرار دادن در دستگاه، نمونه های مورد نیاز به صورت جداگانه و قبل از هر آزمایش برداشت شده و فرآیند خشک کردن انجام گردید.

صفات اندازه گیری شده در تحقیق جاری عبارتند از: دما و رطوبت نسبی هوای ورودی، داخل و خروجی خشک کن، دبی جرمی هوای خشک کننده، محتوای رطوبت برگ های به لیمو و مدت زمان خشک شدن.

جهت اندازه گیری دما و رطوبت هوای محیط و داخل خشک کن از حسگر حرارتی هوشمند AM2301 استفاده شد. حسگر مذکور دارای دقت ۰/۵ درجه سانتیگراد در اندازه گیری دما و ۰/۳ درصد در اندازه گیری رطوبت نسبی می باشد. هشت عدد از این نوع حسگر در نقاط مختلف ساختمان خشک کن خورشیدی تعبیه شد تا بتوان به صورت لحظه ای و با استفاده از داده بردار^۱ آردینو داده های مربوط به دما و رطوبت را ثبت نمود. یک عدد از این حسگرها در ورودی جمع کننده خورشیدی، یک عدد در خروجی جمع کننده، یک عدد برای اندازه گیری دما در بستر محصول، دو عدد در زیر سینی محصول روی دیواره محفظه، دو عدد بالای سینی محصول روی دیواره محفظه و یک عدد در خروجی محفظه خشک کن نصب گردید. برای اندازه گیری دبی هوای خشک کننده از یک سرعت سنج سیم داغ^۲ مدل testo 405i با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه استفاده شد. برای این منظور ابتدا دستگاه را روشن کرده تا به تعادل برسد و سپس در چند نقطه از خروجی محفظه خشک کن، سرعت خروجی هوا ثبت می شد. پس از ثبت داده ها، میانگین آن ها را حساب کرده و به عنوان سرعت خروجی هوا در نظر گرفته می شود. با ضرب کردن سرعت هوای خروجی در مساحت دهانه لوله خروجی هوا، دبی هوای خشک کننده بدست می آید. اگر این عدد را در دانسیته هوا ضرب کنیم، دبی جرمی هوای خشک کننده به دست می آید.

برای اندازه گیری رطوبت برگ به لیمو در فواصل زمانی مختلف در طول فرآیند خشک شدن، ابتدا رطوبت اولیه برگ به لیمو بر پایه وزن خشک محاسبه گردید. جهت تعیین رطوبت به لیمو نمونه برداری شده از دستگاه آون و ترازوی A&D با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. ابتدا نمونه را وزن کرده سپس به مدت ۲۴ ساعت داخل آون در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد قرار داده تا خشک شوند. اختلاف بین وزن اولیه و ثانویه برابر میزان رطوبت اولیه به لیمو قبل از خشک شدن را به دست می دهد. در طول فرآیند خشک شدن برگ به لیمو نیز جهت اندازه گیری رطوبت موجود در گیاه، عمل توزین نمونه های در حال خشک شدن با استفاده از ترازوی مدل A&D به فواصل زمانی معین ۱۰ دقیقه انجام گرفته و سپس با توجه به میزان کاهش وزن نسبت به نمونه اولیه و همچنین میزان رطوبت اولیه گیاه بر پایه وزن خشک، رطوبت برگ به لیمو در طول فرآیند خشک شدن اندازه گیری و ثبت می شد.

تحلیل انرژی و اکسرژی

¹ - Data Logger
² - Hotwire

به منظور محاسبه نرخ انرژی مصرفی از رابطه (۱) استفاده شد: [۷ و ۱۰]

$$E_{in} = \dot{m}c_p\Delta t \quad (1)$$

که در این رابطه، E_{in} ، نرخ انرژی مصرفی خشک کن (کیلو وات)، \dot{m} نرخ جریان جرمی هوا (کیلو گرم بر ثانیه)، c_p ، گرمای ویژه هوای خشک کننده (کیلو ژول بر کیلو گرم درجه سلسیوس) و Δt ، اختلاف دمای هوای محیط با هوای ورودی به محفظه خشک کن (درجه سلسیوس) می باشد.

برای محاسبه انرژی مصرفی ویژه^۳ رابطه (۲) مورد استفاده قرار گرفت: [۶]

$$SEC = E_{in}t/M \quad (2)$$

که در این رابطه SEC انرژی مصرفی ویژه (مگاژول بر کیلو گرم آب خارج شده از محصول)، t ، زمان خشک شده (ثانیه)، M ، جرم آب خارج شده از محصول (کیلو گرم) می باشد.

همچنین توان مفید (توانی که صرفاً صرف تبخیر رطوبت از ماده خشک شونده می شود) از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$E_{out} = m_s \cdot l_g \quad (3)$$

که در این رابطه، E_{out} ، توان مفید مصرف شده برای خشک کردن (کیلو وات)، m_s نرخ تبخیر ماده خشک شوند (کیلو گرم بر ثانیه) و l_g گرمای نهان تبخیر آب (کیلوژول بر کیلو گرم آب) می باشد.

به منظور محاسبه نسبت انرژی استفاده شده^۴ از رابطه (۳) استفاده شد:

$$EUR = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (4)$$

به منظور تحلیل اکسرژی ابتدا اکسرژی ورودی به اتاقک خشک کن مطابق رابطه (۵) محاسبه شد:

$$Ex_{in} = \dot{m}c_p(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0}) \quad (5)$$

همچنین اکسرژی خروجی با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد:

$$Ex_{out} = \dot{m}c_p(T_2 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_2}{T_0}) \quad (6)$$

که در این روابط:

Ex_{in} و Ex_{out} به ترتیب نرخ اکسرژی ورودی و خروجی (کیلو وات)، T_1 و T_2 به ترتیب نشان دهنده دمای هوای ورودی و خروجی محفظه خشک کن (درجه سلسیوس) و T_0 دمای هوای محیط (درجه سلسیوس) می باشند.

با استفاده از روابط ۷ و ۸ به ترتیب می توان بازدهی و اتلافات اکسرژی را بدست آورد:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} \quad (7)$$

$$Ex_{loss} = Ex_{in} - Ex_{out} \quad (8)$$

نتایج و بحث

محاسبه مصرف انرژی ویژه خشک کردن برگ های به لیمو در حالت های مختلف خشک شدن نشان داد که این مقدار با افزایش دما افزایش یافته و با افزایش سرعت هوای خشک کننده کاهش می یابد. بر این اساس در حالت خشک کردن با سرعت ۲ متر بر ثانیه و دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس، انرژی مصرفی خشک کردن به ترتیب برابر ۲۷۶/۳، ۶۹۴/۷ و ۷۰۸/۰ مگاژول بر کیلو گرم آب خارج شده از محصول بود. در حالی که انرژی مصرفی ویژه خشک کردن برای سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه و دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۲۶۶/۹، ۴۶۹/۸ و ۶۳۸/۰ مگاژول بر کیلو گرم آب خارج شده از محصول بدست آورده شد. همچنین برای آزمایش های خشک کردن با سرعت ۳ متر بر ثانیه و دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس این کمیت به ترتیب مساوی ۲۱۷/۰، ۳۹۱/۳ و ۵۰۱/۸ مگاژول بر کیلو گرم آب

³ Specific energy consumption

⁴ Energy utilization ratio

خارج شده از محصول محاسبه شد. به عبارت دیگر مقدار انرژی مصرفی برای تبخیر یک کیلوگرم آب از برگ های به لیمو با افزایش دمای هوای خشک کننده افزایش می یابد که این ممکن است به این دلیل باشد که برگ های به لیمو دارای سطح وسیع و ضخامت کمی می باشند، بنابراین رطوبت از داخل برگ ها خیلی سریع به سطح آنها می رسد، از اینرو افزایش دمای هوای خشک کننده فقط موجب هدررفت انرژی ورودی می شود. هرچند که افزایش سرعت هوای خشک کننده موجب انتقال سریعتر رطوبت از روی سطح برگ ها شده و بنابراین موجب کاهش مصرف انرژی ویژه خشک کردن می شود. به عبارت دیگر، در محدوده سرعت و دمای مورد استفاده، مقاومت خارجی برای تبخیر آب از محصول غالب بوده است نه مقاومت داخلی.

مطابق تحقیق فرهنگ، به ازای هر کیلووات ساعت انرژی که توسط سوخت های فسیلی تولید شود، حدود ۸۰۰ گرم دی اکسید کربن وارد محیط زیست خواهد شد [۹ و ۱۳]. از اینرو در صورتیکه برای تامین انرژی خشک کردن برگ های به لیمو از منابع سوخت های فسیلی استفاده شود، به ازای هر کیلوگرم آبی که از برگ ها خارج شود، در سرعت ۲ متر بر ثانیه و دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس، ۶۱/۴، ۱۵۴/۴ و ۱۵۷/۳ گرم، در سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه و دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس، حدود ۵۹/۳، ۱۰۴/۴ و ۱۴۱/۸ گرم و همچنین در سرعت ۳ متر بر ثانیه و دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس حدودا دی اکسید کربن وارد محیط زیست می شود. همچنین در سرعت های ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه مطابق رابطه فرهنگ چنانچه از سوخت های فسیلی برای خشک کردن برگ های به لیمو استفاده شود، مقدار ۴۸/۲، ۸۶/۹ و ۱۱۱/۵ گرم دی اکسید کربن وارد محیط زیست می شود. به عبارت دیگر با استفاده از خشک کن خورشیدی استفاده شده در پژوهش حاضر می توان ادعا کرد که به ازای هر کیلوگرم آبی که از برگ های به لیمو در حین خشک کردن خارج می شود، بین ۴۸/۲ تا ۱۵۷/۳ گرم دی اکسید کربن کمتری وارد محیط خواهد شد.

تاثیر سرعت هوا، دمای هوا و زمان خشک شدن بر نسبت مصرف انرژی^۵ و اکسرژی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج تجزیه واریانس در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- تجزیه واریانس تاثیر سرعت و دمای هوای خشک کننده بر نسبت مصرف انرژی و بازدهی اکسرژی

منابع تغییر	متغیر	مجموع	درجه	میانگین	مقدار F	معنی
	وابسته	مربعات	آزادی	مربعات		داری
سرعت	نسبت	۱/۷۸	۲	۰/۸۹	۴/۹۵	*
	مصرف انرژی					
	بازدهی	۰/۰۱۷	۲	۰/۰۰۸	۸/۱	*
	اکسرژی					
دما	نسبت	۹۱/۸۹	۲	۴۵/۹۵	۲۵۷/۴۱	*
	مصرف انرژی					
	بازدهی	۴/۰۱۲	۲	۲/۰۰۶	۲۰۰۷	*
	اکسرژی					
سرعت × دما	نسبت	۰/۵۳۱	۴	۰/۱۳	۰/۷۴۳	Ns
	مصرف انرژی					
	بازدهی	۰/۴۲۷	۴	۰/۱۰۷	۱۰۷/۹۰	*
	اکسرژی					

⁵ EUR

خطا	نسبت	۳/۲۴	۱۸	۰/۱۸
	مصرف انرژی			
	بازدهی	۰/۰۱۸	۱۸	۰/۰۰۱
	اکسرژی			
کل	نسبت	۹۷/۴۴	۲۶	۳/۷۵
	مصرف انرژی			
	بازدهی	۴/۴۸	۲۶	۰/۱۷۲
	اکسرژی			

*: معنی داری در سطح ۰/۰۱ و Ns: عدم معنی داری

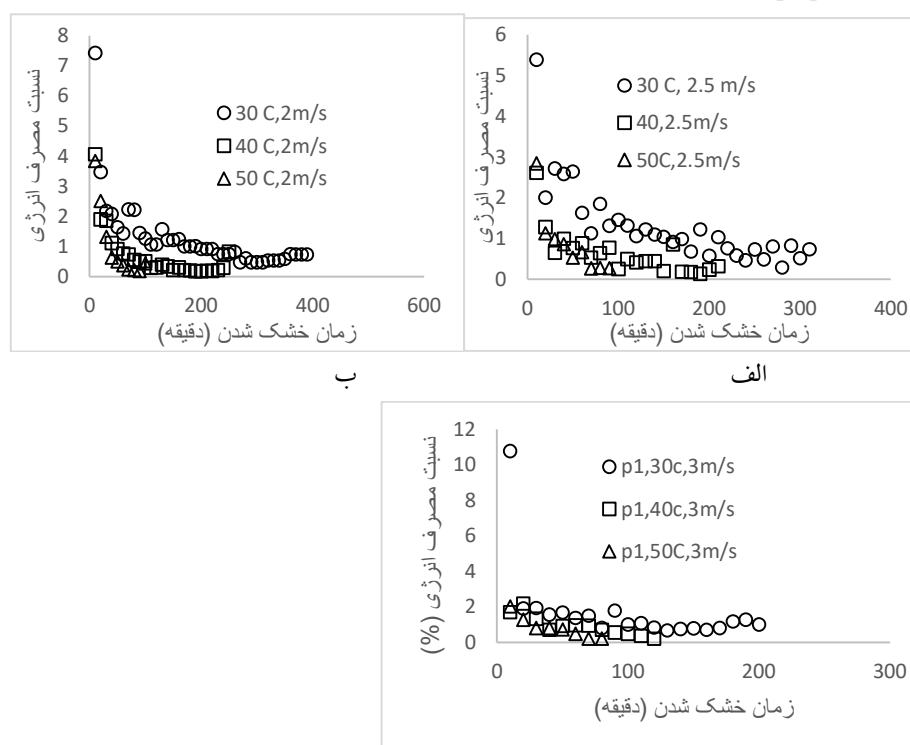
همانگونه که مشخص است، بجز اثر متقابل سرعت و دمای هوای خشک کننده بر نسبت مصرف انرژی، اثر دما و هوا و همچنین اثر متقابل آنها بر نسبت مصرف انرژی و اکسرژی در سطح یک درصد معنی دار شده است. در جدول ۲، مقایسه میانگین نسبت مصرف انرژی و اکسرژی تحت شرایط مختلف دما و سرعت هوا آورده شده است. مطابق این جدول، با افزایش دما و کاهش سرعت نسبت مصرف انرژی کاهش می یابد به گونه ای که بیشترین مقدار نسبت مصرف انرژی (در محدوده ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس و ۲ تا ۳ متر بر ثانیه) در سرعت ۳ متر بر ثانیه و دمای ۳۰ درجه سلسیوس می باشد. همچنین کمترین مقدار نسبت مصرف انرژی در سرعت ۲ متر بر ثانیه و دمای ۵۰ درجه سلسیوس است. همانگونه که در قسمت انرژی ویژه بحث شد، این پدیده ممکن است به این دلیل باشد که محتوای رطوبت برگ های به لیمو به طور کلی بالا بوده و از آنجایی که ضخامت برگ ها کم و سطح آن ها در مقایسه با جرم شان بیشتر است، نرخ انتقال رطوبت از داخل برگ ها به سطح شان بالا بوده و لذا با افزایش سرعت هوای خشک کننده این رطوبت از سطح برگ ها سریعتر به هوای خشک کننده انتقال می یابد. از این رو افزایش سرعت هوای خشک کننده در محدوده مذکور منجر به افزایش نسبت مصرف انرژی شده است. هر چند که افزایش دما به دلیل فیزیولوژی برگ ها (نازک بودن و مساحت بالای آنها) تاثیر چندانی بر تسریع روند انتقال رطوبت از درون به سطح برگ ها نداشته است. به عبارت دیگر مقاومت بیرونی در فرایند انتقال رطوبت از ماده به هوا بیشتر از مقاومت داخلی فرایند انتقال رطوبت از درون ماده به سطح آن می باشد بنابراین افزایش سرعت هوا باعث انجام کار مفید و افزایش نسبت مصرف انرژی می شود. در تحقیقی دیگر تحلیل انرژی خشک کردن برگ های نعنا در یک خشک کن خورشیدی نشان داد که با افزایش دما بازدهی انرژی کاهش می یابد [۴]. نتایج نشان داد بیشترین مقدار بازدهی اکسرژی در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه و دمای ۵۰ درجه سلسیوس و کمترین مقدار آن در سرعت ۲ متر بر ثانیه و دمای هوای ۳۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. این نتیجه در تطابق با سایر تحقیقات مشابه می باشد [۵ و ۱۱]. در تحقیقی فرایند خشک شدن برگ های نعنا در یک خشک کن خورشیدی جریان چرخشی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج تحقیق مذکور نشان داد با افزایش دمای بستر محصول، بازدهی اکسرژی افزایش و نسبت مصرف انرژی کاهش می یابد [۱۱]. همچنین در تحقیقی دیگر فرایند خشک کردن برگه های کاغذ در یک خشک کن جریان هوای گرم مورد بررسی قرار گرفت. آنها دو سطح دمای ۹۰ و ۱۵۰ درجه سلسیوس و دو سطح سرعت هوای ۰/۵ و ۱/۴ متر بر ثانیه را برای فرایند خشک کردن استفاده کردند. نتایج محاسبه بازدهی اکسرژی نشان داد که با افزایش سرعت و دمای هوای خشک کننده مقدار بازدهی اکسرژی نیز افزایش می یابد [۵]. در تحقیق مشابه دیگری، تحلیل اکسرژی در دو سرعت ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه نشان داد که با افزایش سرعت هوای خشک کننده، بازدهی اکسرژی افزایش می یابد [۱].

جدول ۲- مقایسه میانگین مقادیر نسبت مصرف انرژی در حالت های مختلف سرعت و دمای هوای خشک کننده

سرعت هوای خشک کننده (متر بر ثانیه)	دمای هوای خشک کننده (درجه سلسیوس)	میانگین بازده انرژی (%)	میانگین بازده انرژی اکسرژی (%)
۲	۳۰	C۱/۰۳۵	F۰/۵۷۱

F ₀ /584	G ₀ /491	40	2
C ₀ /725	G ₀ /489	50	2
E ₀ /664	B ₁ /127	30	2/5
E ₀ /667	G ₀ /500	40	2/5
B ₀ /79	F ₀ /550	50	2/5
D ₀ /685	A ₁ /673	30	3
C ₀ /711	D ₀ /919	40	3
A ₀ /863	E ₀ /820	50	3

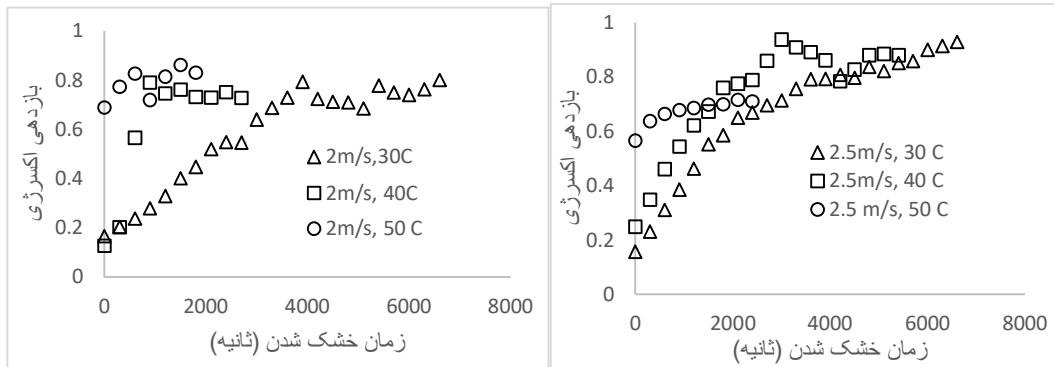
در شکل (۲) مقادیر نسبت مصرف انرژی تحت دماهای مختلف خشک شدن با هم مقایسه شده است. در همه حالت ها با گذشت زمان، مقدار نسبت مصرف انرژی کاهش می یابد. در شکل ۲-الف، ب و ج به ترتیب مقادیر نسبت مصرف انرژی برای خشک کردن با سرعت هوای ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه و دماهای مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل، منحنی مربوط به دمای ۳۰ درجه سلسیوس دارای بیشترین بازدهی در مقایسه با منحنی مربوط به دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس است. کاهش نسبت مصرف انرژی در آزمایش های خشک شدن با دمای کمتر به این دلیل است که با افزایش دما مصرف انرژی غیر مفید افزایش یافته و این انرژی بیشتر صرف گرم کردن هوای خروجی می شود. از این رو نسبت مصرف انرژی با افزایش دمای هوای خشک کننده کاهش می یابد. در یک تحقیق تحلیل اکسرژی فرایند خشک شدن تکه های هویج در یک خشک کن بستر سیال تحت سه دمای مختلف ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام گرفت که نتایج بدست آمده نشان داد با افزایش دمای هوای خشک کننده بازدهی اکسرژی افزایش می یابد [۱۲]. در پژوهشی دیگر تحلیل انرژی و اکسرژی فرایند خشک کردن برگ های نعنا در یک خشک کن چرخشی آب گرم نشان داد که با افزایش دمای بستر محصول، بازدهی اکسرژی افزایش می یابد به گونه ای که در دمای بستر ۵۳/۱ درجه سلسیوس بازدهی اکسرژی برابر ۰/۸ و در دمای ۴۱/۳ درجه سلسیوس مساوی ۰/۴۳ بدست آورده شد [۱۱].



ج

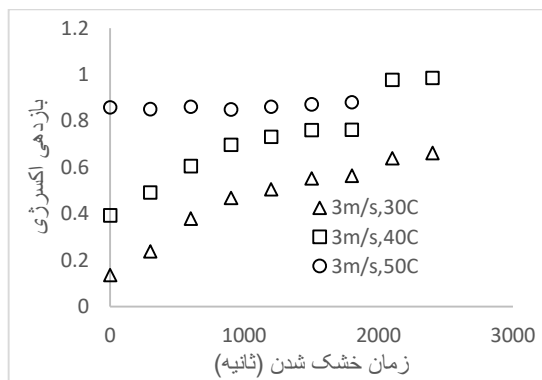
شکل ۲- تغییرات نسبت مصرف انرژی برای سرعت هوای خشک کننده (الف) ۲ متر بر ثانیه، (ب) ۲/۵ متر بر ثانیه و (ج) ۳ متر بر ثانیه

مقادیر بازدهی اکسرژی در دماهای مختلف و سرعت های ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه در شکل های ۴-الف، ب و ج نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است در سرعت ثابت هوای خشک کننده، با افزایش دمای هوای خشک کننده، بازدهی اکسرژی افزایش می یابد.



ب

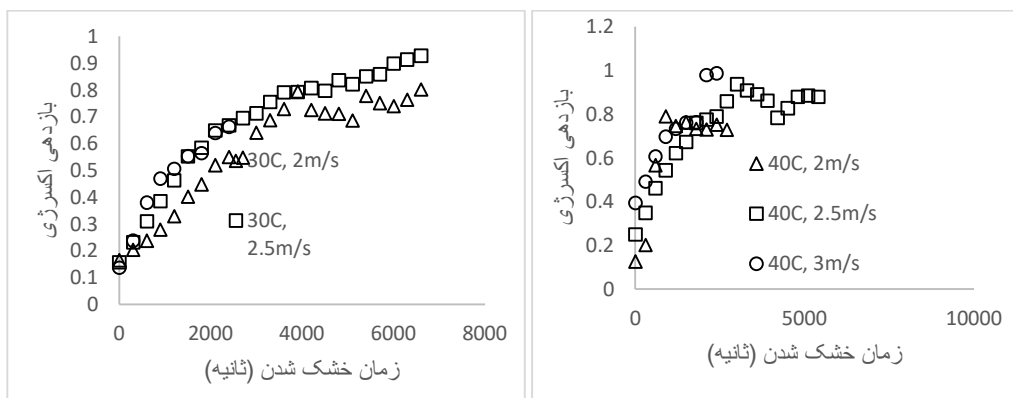
الف



ج

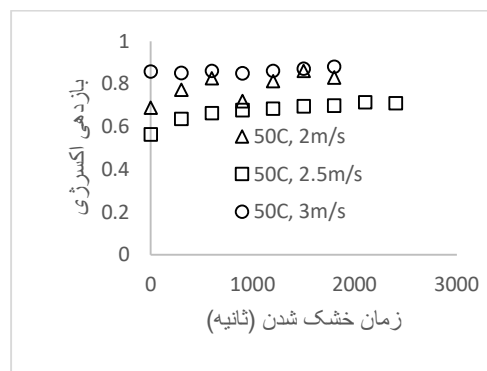
شکل ۳- تغییرات بازدهی اکسرژی برای سرعت هوای خشک کننده (الف) ۲ متر بر ثانیه، (ب) ۲/۵ متر بر ثانیه و (ج) ۳ متر بر ثانیه

در شکل ۵، مقادیر بازدهی اکسرژی برای سرعت های مختلف و دماهای مختلف ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس در شکل الف، ب و ج نشان داده شده است.



ب

الف



ج

شکل ۴- تغییرات بازدهی اکسژنی برای دمای الف) ۳۰ درجه سلسیوس، ب) ۴۰ درجه سلسیوس و ج) ۵۰ درجه سلسیوس

نتیجه گیری کلی

یک خشک کن خورشیدی جریان هوای گرم به منظور خشک کردن برگ های به لیمو مورد استفاده قرار گرفت. نتایج انرژی ویژه خشک کردن نشان داد که با استفاده از خشک کن مزبور می توان به مقدار زیادی در مصرف سوخت های فسیلی صرفه جویی کرده و مقدار دی اکسید کربن کمتری را وارد محیط زیست کرد. همچنین نتایج تحلیل انرژی و اکسژنی نشان داد که دما تاثیر کاهشی بر بازده انرژی دارد. از اینرو استفاده از خشک کن خورشیدی معرفی شده در دماهای کمتر برای خشک کردن برگ های به لیمو توصیه می شود.

منابع

- ۱- باقری، هادی، عرب حسینی، ا. و کیانمهر، م. ح. ۱۳۹۴. تحلیل اثر انرژی و اکسژنی در خشک کن خورشیدی با هوای اجباری برای ورقه های نازک گوجه فرنگی. مجله مهندسی بیوسیستم ایران ۴۶(۱): ۳۹-۴۵.
- ۲- مرادی، م. و زمردیان، ع. ۱۳۸۸. بررسی سینتیک خشک شدن زیره سبز در یک خشک کن خورشیدی در دو حالت تابش مختلط و غیرمستقیم. مجله علوم آب و خاک ۱۳(۴۸): ۲۷۳-۲۸۲.
- ۳- مومنی، ت. و شاهرخی، ن. ۱۳۷۷. اسانس های گیاهی و اثرات درمانی آن ها. تهران، ایران، انتشارات دانشگاه تهران.
- 4- Akpinar, E. 2010. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. Energy conversion and management, 51: 2407-2418.
- 5- Assari, M. R., Tabrizi, H. B., and Najafpour, E. 2013. Energy and exergy analysis of fluidized bed dryer based on two-fluid modeling. International Journal of Thermal Sciences, 64: 213-219.
- 6- Boulemtafes-Boukadoum, A., and Benzaoui, A. 2011. Energy and exergy analysis of solar drying process of Mint. Energy Procedia, 6: 583-591.
- 7- Dinçer, İ., and Zamfirescu, C. 2016. Drying phenomena: theory and applications. John Wiley & Sons. doi:10.1002/9781118534892.ch4
- 8- Duffie, J. A., and Beckman, W. A. 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, USA. 919p.

- 9- Ferhat, M. A., Meklati, B. Y., Smadja, J., and Chemat, F. 2006. An improved microwave Clevenger apparatus for distillation of essential oils from orange peel. *Journal of Chromatography A*, 1112(1-2): 121-126. doi:10.1111/jfpp.12930
- 10- Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M. Y., and Ruslan, M. H. 2014. Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed. *Energy and Buildings*, 68: 121-129.
- 11- Moradi, M., Fallahi, M. A., and Mousavi Khaneghah, A. 2020. Kinetics and mathematical modeling of thin layer drying of mint leaves by a hot water recirculating solar dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 43(1): e13181.
- 12- Nazghelichi, T., Kianmehr, M.H., and Aghbashlo, M. 2010. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *Energy* 35: 4679-4684.
- 13- Seidi damyeh, M., and Niakosari, M. 2017. Ohmic hydrodistillation, an accelerated energy-saver green process in the extraction of *Pulicaria undulata* essential oil *Industrial Crops and Products*, 98:100-107.
- 14- Tarhan, S., Telci, I., Tuncay, M. T., and Polatci, H. 2010. Product quality and energy consumption when drying peppermint by rotary drum dryer. *Industrial Crops and Products*, 32(3): 420-427. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.06.003>
- 15- Tasic, J.R., Gojak, M., Cupric, N.L., and Bozovich, M.R. 2018. Active Solar Dryer for Biological Materials. *FME Transactions*, 46: 537-543. doi: 10.5937/fmet1804537T.
- 16- Tripathy, P.P. 2015. Investigation into solar drying of potato: effect of sample geometry on drying kinetics and CO₂ emissions mitigation. *Journal of Food Science and Technology*, 52(3): 1383-1393. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1170-0>
- 17- Tyagi, H., Agarwal, A.K., Chakraborty, P.R., and Powar, S. 2018. Introduction to Applications of Solar Energy. In: Tyagi H., Agarwal A., Chakraborty P., Powar S. (eds) *Applications of Solar Energy. Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-10-7206-2_1
- 18- Zomorodian, A., Moradi, M. 2010. Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for *Cuminum cyminum*. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12: 401-408.

Drying process of lemon verbena leaves in a solar dryer: energy and exergy analysis

Mehdi Moradi *¹, Javid Ghasemi abnavi ¹

1- Biosystems Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract

A cabinet solar dryer was used to evaluate the energy efficiency of the lemon verbena leaves drying process. The dryer had a dark flat collector plate that was installed at a 45-degree angle to the horizon. By blowing air through a centrifugal blower onto this solar-heated plate, the drying air was heated, and by entering the drying cabinet containing the product tray, the leaves were dried. In order to evaluate the dryer apparatus, three different levels of drying air temperature (30, 40, and 50 °C) and three levels of drying air velocity (2, 2.5 and 3 m/s) were applied. Sensors were installed in different parts of the device to store temperature and humidity instantaneously in a central processor. Using the data, energy and exergy analysis were performed. The results showed that with increasing temperature and decreasing velocity, the amount of energy consumption ratio decreases, so that the highest energy consumption ratio was obtained in the experiment with a temperature of 30 °C and a velocity of 3 m/s. Also, the highest exergy efficiency was observed at a velocity of 3 m/s and a temperature of 50 °C.

key words:

Specific drying energy, energy consumption ratio, carbon dioxide, renewable energy sources

*Corresponding author

E-mail: moradih@shirazu.ac.ir