

بررسی سینتیک خشک شدن، انرژی مصرفی و خصوصیات کیفی محصول گل گاوزبان (*Echium amoenum*) در یک خشک کن خورشیدی مجهز شده با لامپ مادون قرمز

نجمه طهرانی زاده کرمانی¹، محمد مهدی مهارلویی^{2*}، حمید مرتضی پور³

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

2- استادیار بخش مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

3- استادیار بخش مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(تاریخ دریافت: 98/08/22 تاریخ پذیرش: 98/12/10)

چکیده

در پژوهش حاضر نمونه‌ی آزمایشگاهی یک خشک‌کن خورشیدی مجهز شده با لامپ مادون قرمز کمکی ارائه شده و سینتیک خشک شدن، انرژی و کیفیت رنگ گل گاوزبان در توان های 100، 150 و 213 وات لامپ مادون قرمز و دبی حجمی هوای عبوری 0/0025 و 0/005 مترمکعب بر ثانیه، بررسی گردید. نتایج حاصل از ارزیابی کیفیت رنگ و مصرف انرژی با نتایج بدست آمده از خشک کردن گل گاوزبان به روش مرسوم (سایه خشک) مقایسه شد. پنج مدل ریاضی بر داده‌های تجربی سینتیک خشک شدن محصول برازش گردید و ارزیابی مدل‌ها با سه معیار ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب مربع کای (χ^2) صورت گرفت. نتایج نشان داد تاثیر توان لامپ‌های مادون قرمز، دبی حجمی هوا و اثر متقابل آن‌ها بر زمان خشک شدن گاوزبان معنادار است ($p < 0/01$). مدت زمان خشک شدن گاوزبان در سایه خشک 24 ساعت اندازه گیری گردید. در استفاده از خشک‌کن خورشیدی بررسی، با افزایش توان لامپ مادون قرمز از 100 به 213 وات و افزایش دبی حجمی هوا از 0/0025 به 0/005 متر مکعب بر ثانیه، زمان خشک شدن نمونه‌ها به ترتیب 37 درصد و 17 درصد کاهش یافت. بهترین مدل برای بررسی روند خشک شدن گاوزبان مدل پیچ تعیین گردید. کمترین انرژی مصرفی ویژه (4/63 مگاژول بر کیلوگرم) مربوط به شرایط خشک کردن در دبی هوای عبوری 0/005 مترمکعب بر ثانیه توان 150 وات لامپ مادون قرمز و بیشترین انرژی مصرفی ویژه (5/26 مگاژول بر کیلوگرم) در دبی 0/0025 مترمکعب بر ثانیه و توان 213 وات لامپ مادون قرمز بود. در مجموع براساس نتایج مصرف انرژی و کیفیت رنگ محصول نهایی، روش خشک کردن در دبی هوای 0/005 مترمکعب بر ثانیه و توان 150 وات لامپ مادون قرمز توصیه شد. در سنجش پارامترهای رنگ، نمونه‌های خشک شده در دبی هوای 0/005 مترمکعب بر ثانیه و توان 213 وات لامپ مادون قرمز نسبت به نمونه‌های خشک شده به روش سنتی کیفیت بالاتری داشتند اما به دلیل مصرف انرژی بالاتر، این تیمار به عنوان مناسب‌ترین تیمار در این مطالعه انتخاب نشد.

کلید واژگان: گل گاوزبان، انرژی مصرفی ویژه، خشک کردن، مادون قرمز، ویژگی‌های رنگی، آزمون حساسی

* مسئول مکاتبات: maharlooei@uk.ac.ir

1- مقدمه

اهمیت تولید و فرآوری گیاهان دارویی به دلیل عوارض جانبی کمتر در مقایسه با داروهای شیمیایی، روز به روز در حال افزایش است. یکی از مسائل مهم در بخش کشاورزی و علوم پزشکی و حتی تجارت جهانی گیاهان دارویی، توجه به تولید، فرآوری و استفاده از این گیاهان است [1]. گل گاوزبان، با نام علمی *Echiummamoenum*، گیاه دارویی باارزشی است که در بیشتر مناطق ایران کشت می‌شود. در طب سنتی ایران، گل گاوزبان به عنوان آرام‌بخش، عرق‌آور و کاهنده فشار خون به کار می‌رود [2].

خشک کردن یک فرآیند پیچیده با مصرف انرژی زیاد است. انتخاب روش خشک کردن مناسب می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، باعث بهبود کیفیت محصول تولیدی گردد [3, 4]. انرژی مورد نیاز برای خشک کردن صنعتی به طور معمول از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد. به دلیل افزایش قیمت جهانی سوخت‌های فسیلی و تجمع گازهای گلخانه‌ای در جو و به دنبال آن افزایش دمای کره زمین و آلودگی زیست محیطی آن‌ها، توجه زیادی به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر به عنوان جایگزین یا مکمل برای سوخت‌های فسیلی معطوف شده است. در این راستا استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی به عنوان یک راه‌حل مورد توجه قرار گرفته و به صورت فزاینده‌ای در حال رشد است [5]. یک خشک‌کن خورشیدی برای خشک کردن برگ‌های استویا طراحی و عملکرد آن با روش خشک کردن زیر آفتاب مستقیم مقایسه گردید. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که زمان خشک‌شدن در خشک‌کن خورشیدی 62 درصد کوتاه‌تر از روش سنتی است. بررسی‌های کیفی نشان داد که محتوای آنتی‌اکسیدان نمونه‌های خشک شده در خشک‌کن خورشیدی بالاتر بود. همچنین، در ارزیابی حسی محصول نهایی، نمونه‌های خشک‌شده در خشک‌کن خورشیدی در مقایسه با روش سنتی در آفتاب مقبولیت بیشتری داشتند. در این تحقیق دوره بازگشت سرمایه برای خشک‌کن خورشیدی 0/65 سال تعیین گردید [6]. در تحقیقی Essalhi و همکاران اقدام به مقایسه دو روش خشک‌کنی شامل خشک کردن سنتی زیر آفتاب مستقیم و استفاده از خشک‌کن خورشیدی غیر مستقیم کردند. نتایج تحقیق نشان داد که با استفاده از خشک‌کن خورشیدی، زمان خشک شدن دانه‌های انگور از 201 ساعت به 120 ساعت کاهش یافت. در این

تحقیق از 10 مدل ریاضی برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن انگور استفاده گردید و در نهایت مدل میدیلی و همکاران به عنوان مناسب‌ترین مدل برای هر دو روش خشک‌کنی انتخاب گردید [7].

یکی از روش‌های در حال گسترش در خشک کردن مواد غذایی، استفاده از تابش مادون قرمز است. وقتی که پرتو مادون قرمز به سمت محصول تابانده شود، بسته به محصول و طول موج پرتو تابیده شده، قسمتی از پرتو از محصول عبور کرده، درصدی از آن منعکس می‌شود و بالاخره بخشی هم جذب شده و به داخل نفوذ می‌کند و به انرژی حرارتی تبدیل می‌گردد. سپس جسم به شدت گرم شده و گرادیان حرارتی در داخل جسم در مدت کوتاهی به شدت کاهش پیدا می‌کند [8]. به امواج الکترومغناطیس با طول موج 0/75 تا 1000 میکرومتر، مادون قرمز گویند. در خشک‌کن‌های مادون قرمز، مکانیزم انتقال حرارت به سطح محصول به صورت تابشی است. لذا، مشخصه اصلی این خشک‌کن‌ها، عدم نیاز به محیط مادی برای انتقال حرارت از منبع گرم به محصول می‌باشد. بعلاوه، آب دارای ضریب جذب نور بالایی در طول موج‌های 2/7، 3/3، 6 و بالاتر از 12/5 میکرومتر است. در این طول موج‌ها، پیوند-های اکسیژن-هیدروژن مولکول‌های آب با جذب انرژی مادون قرمز، شروع به چرخش با فرکانس موج جذب شده می‌کنند که این امر موجب افزایش انرژی جنبشی و جدا شدن مولکول از فاز مایع (تبخیر) می‌گردد. از جمله مزیت‌های خشک‌کن‌های مادون قرمز می‌توان به بازده انرژی بالا به دلیل ضریب انتقال حرارت مناسب تابش مادون قرمز و کاهش احتمال آلودگی سطح محصول به دلیل عدم تماس مستقیم منبع حرارتی یا ماده گرم با سطح محصول اشاره کرد. از این رو، خشک‌کن‌های مادون قرمز به عنوان خشک‌کن‌هایی با ضریب انتقال حرارت و جرم بالا شناخته می‌شوند [9].

نتایج تحقیق در خصوص استفاده از اشعه مادون قرمز برای خشک کردن فلفل سبز نشان داد که استفاده از مادون قرمز در دوره خشک کردن به طور قابل توجهی زمان خشک کردن را کوتاه و کیفیت محصول را بالا می‌برد [10]. پژوهشگران در تحقیقی بیان داشتند که خشک کردن به روش مادون قرمز متفاوت از خشک شدن همرفتی است، زیرا انرژی مادون قرمز به طور مستقیم توسط مواد جذب شده و مانند روش همرفتی نیازی به هوا برای انتقال گرما نیست. انرژی مادون قرمز بدون

فناوری در تولید محصولات کشاورزی، هزینه تولید افزایش پیدا کرده و از سوی دیگر کیفیت ظاهری و همچنین ترکیبات موثره خود را طی فرایند خشک کردن به طور قابل ملاحظه‌ای از دست می‌دهد که این امر به طور جدی بر مصرف و صادرات آن تاثیرگذار است. در پژوهش حاضر پارامترهای کیفی فرایند خشک کردن گیاه دارویی گاوزبان به منظور بررسی بازار پسندی، شاخص کیفیت رنگ، مصرف انرژی و ارائه مناسب‌ترین مدل برای خشک کردن محصول با استفاده از خشک‌کن تلفیقی خورشیدی و سامانه مادون قرمز بررسی شد. گل گاوزبان به دلیل خواص دارویی، تغذیه‌ای و صادراتی از اهمیت زیادی برخوردار است. اثرات خشک کردن بر روی این گیاه کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مشخصات خشک‌کن

به منظور بررسی خشک شدن گل گاوزبان تحت تأثیر جریان هوای گرم و تابش مادون قرمز، از یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به لامپ مادون قرمز استفاده گردید. این خشک‌کن شامل جمع‌کننده خورشیدی، محفظه‌ی محصول، سینی نگهداری محصول، کانال رابط، شاسی، لامپ مادون قرمز و مکنده می‌باشد. شکل 1 طرح‌واره‌ای از خشک‌کن مورد نظر را نشان می‌دهد.

این که محیط اطراف را گرم کند، از طریق منبع تابشی به سطح محصول منتقل می‌شود، در نتیجه اتلاف انرژی کاهش می‌یابد [11]. در تحقیقی سیستیک خشک شدن ورقه‌های سیب زمینی در خشک‌کن ترکیبی خورشیدی متناوب مادون قرمز مجهز به سامانه‌ی تولید برق فتوولتائیک بررسی گردید [12]. نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از آزمایشات مشابه در یک خشک‌کن خورشیدی جریان طبیعی مقایسه گردید. بررسی‌ها حاکی از کاهش حداقل 75% و حداکثر 83% زمان خشک شدن نسبت به خشک‌کن خورشیدی جریان طبیعی می‌باشد. بعلاوه بیشترین و کمترین مقدار آهنگ ویژه از دست دادن رطوبت ورقه سیب‌زمینی به ترتیب 0/56 و 0/23 کیلوگرم بر وات ساعت انرژی مصرفی بدست آمد. همچنین، ترکیب مادون قرمز، سامانه بازیافت حرارت و جمع‌کننده‌ی خورشیدی، برای خشک کردن خربزه با کارایی مناسب و بازده انرژی بالا ارزیابی شد [13]. به منظور جبران افت تابش خورشید در پائیز و زمستان در مقایسه با تابستان، در تحقیقی Şevik و همکاران اقدام به طراحی یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به لامپ‌های مادون قرمز کردند. نتایج ارزیابی خشک‌کن نشان داد که استفاده از لامپ‌های مادون قرمز به طور معناداری زمان خشک شدن را کاهش و انرژی مصرفی را افزایش دادند. در مجموع، حدود 62 درصد از انرژی مورد نیاز خشک‌کن، به وسیله‌ی انرژی خورشید تأمین گردید [14].

در کشور ما به دلیل نبود سامانه‌ی بازیافت حرارت استفاده از

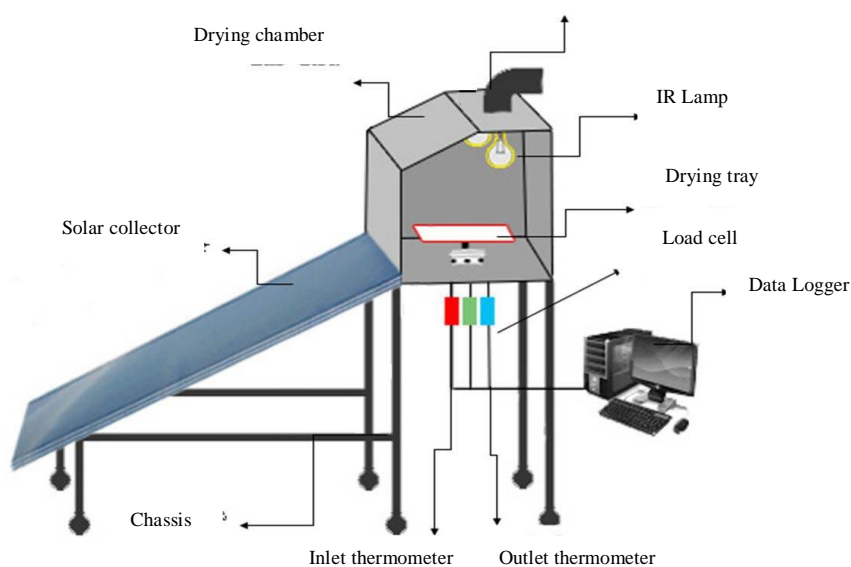


Fig 1 Schematic view of the IR-assisted solar dryer

مادون قرمز و دو جریان هوای 0/0025 و 0/005 متر مکعب بر ثانیه صورت گرفت. با توجه به این‌که محل انجام آزمایش شهر کرمان بود، بنابراین زاویه مناسب جمع‌کننده خورشیدی، 30 درجه نسبت به سطح افق انتخاب شد [15].

به منظور اندازه‌گیری دماهای مورد نیاز در محاسبات مصرف انرژی از چهار عدد حسگر دمای مدل LM35 با دقت $\pm 0/5$ درجه‌ی سلسیوس و محدوده اندازه‌گیری 30- تا 140+ درجه‌ی سلسیوس استفاده گردید. این حسگرها دمای مربوط به محیط، هوای ورودی و خروجی جمع‌کننده و محفظه‌ی خشک‌کن را اندازه‌گیری می‌کردند. برای اندازه‌گیری تغییرات جرم محصول در طول زمان خشک‌شدن، از دو عدد لودسل با ظرفیت 2/5 کیلوگرم با دقت $\pm 0/4$ گرم (مدل L6D، شرکت ZEMIC، ساخت چین) استفاده گردید. این دو لودسل در داخل محفظه خشک‌کن، در دو طرف سینی محصول، نصب و اطلاعات را به یک ترانس‌میتور وزن (مدل TM1020 شرکت مهندسی تیکا، ساخت ایران) ارسال و نتایج از طریق نرم‌افزار بر روی صفحه نمایش رایانه نشان داده می‌شد. برای اندازه‌گیری دبی هوای خشک‌کننده، از یک سرعت‌سنج باد (مدل TES1340، شرکت TES، ساخت تایوان) استفاده شد. شدت تابش خورشید بر روی سطح جمع‌کننده با یک دستگاه سولاری متر (مدل TES 1333 R، شرکت TES، ساخت تایوان) اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری انرژی الکتریکی لامپ‌های مادون قرمز، از یک ترانس‌میتور وات‌متر برق تک‌فاز (مدل TM 1510 ساخت شرکت مهندسی تیکا در ایران) استفاده شد. توان مصرفی دمنده، که دارای تغذیه 12 ولت جریان مستقیم بود، به وسیله یک مولتی‌متر برق، در فاصله‌های زمانی 5 دقیقه‌ای اندازه‌گیری گردید.

برای اندازه‌گیری پارامترهای رنگ مواد غذایی، استفاده از فضای رنگی که توسط کمیسیون بین‌المللی روشنایی (CIE) در سال 1976 انتشار داده شد و به فضای رنگی $L^*a^*b^*$ یا Lab معروف است، استفاده شد [16]. در این روش خصوصیات رنگی ماده، با مولفه‌های روشنایی (L^*)، مولفه سبز-قرمز (a^*) و مولفه آبی-زرد (b^*) شناسایی می‌شود. برای اندازه‌گیری پارامترهای L^* ، a^* و b^* گل‌گاوزبان خشک شده، از دستگاه رنگ‌سنج (مدل TES 135A ساخت شرکت TES کشور تایوان) استفاده گردید. همچنین، به منظور بررسی مقبولیت محصول نهایی، نمونه‌هایی از محصول خشک شده در

جمع‌کننده شامل یک کانال چوبی عایق شده با پشم شیشه به ضخامت 2 سانتی‌متر است. داخل کانال، صفحه‌ی جاذب نور آلومینیومی با مساحت 1/1 مترمربع، که به منظور افزایش سطح تبادل حرارت با جریان هوای خشک‌کننده، روی آن تعدادی پره و سوراخ ایجاد و با رنگ سیاه مات رنگ‌آمیزی شده بود، نصب گردید. سطح بالای جمع‌کننده پوششی از شیشه معمولی دارد. محفظه‌ی خشک‌کن به ابعاد $60 \times 70 \times 80$ سانتی‌متر از جنس چوب و با پوشش پشم شیشه ساخته شده و قسمتی از آن که سینی محصول در آن قرار دارد با پوشش آلومینیومی براق از تابش مستقیم خورشید محافظت شده است. با توجه به ظرفیت محفظه‌ی خشک‌کن و ابعاد آن از یک عدد سینی از جنس توری فلزی ضدزنگ برای قرار دادن محصول در داخل محفظه‌ی خشک‌کن استفاده گردید. هوا پس از عبور از جمع‌کننده‌ی خورشیدی گرم شده، وارد محفظه‌ی خشک‌کن می‌گردد. در این قسمت، با عبور هوای گرم از بستر محصول، رطوبت موجود در آن تبخیر و به خارج از محفظه هدایت می‌شود.

علاوه بر جریان هوای گرم عبوری، فرایند خشک‌کردن در محفظه‌ی خشک‌کن با دو لامپ مادون قرمز کمکی (کوآرتز حلقوی)، که در فاصله 5 سانتی‌متری از بالای سینی گل‌گاوزبان نصب شده و توان تابشی آن‌ها با دایمر قابل تنظیم بود، انجام شد. برای به جریاندراوردن‌هوايخشک‌کننده در قسمت‌های مختلف خشک‌کن از یک‌مکننده گریز از مرکز استفاده شد. این‌مکننده‌ها رابولتاژ تغذیه 12 ولت جریان مستقیم‌ها توان مصرفی 45 وات بود که توسط یک باتری تغذیه می‌شد.

2-2- روش انجام آزمایش

پس از آماده‌سازی خشک‌کن خورشیدی مجهز به لامپ مادون قرمز، آزمایش‌های مربوط به ارزیابی آن در تیر و مردادماه 1397 در گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شد. برای این منظور، دستگاه در محوطه‌ی باز، زیر نور مستقیم خورشید، به سمت جنوب قرار گرفت. نمونه‌های سالم و تازه گل‌گاوزبان از روستای عرب آباد کرمان تهیه و در آزمایشگاه در دمای 4 درجه سلسیوس نگهداری شد. در هر مرحله از آزمایش، مقدار 500 گرم از محصول خشک گردید. فرایند خشک کردن تا زمانی که تغییری در وزن محصول مشاهده نشود، ادامه یافت. آزمایش‌ها در سه سطح توان 100، 150 و 213 وات لامپ‌های

2-3- پارامترهای مورد ارزیابی

2-3-1- انرژی مصرفی

انرژی الکتریکی مصرفی (J)، از رابطه 3 محاسبه شد [15].

$$E_{el} = \int P_{fan} \cdot dt + E_{IR} \quad (3)$$

که در آن E_{el} انرژی الکتریکی (J)، توان ممکنه (W)، dt فاصله زمانی اندازه‌گیری توان ممکنه (s) و انرژی مصرفی لامپ‌های مادون قرمز (J) می‌باشند.

انرژی مورد نیاز خشک کردن در خشک‌کن مورد ارزیابی برابر با مجموع انرژی خورشیدی و الکتریکی مصرفی است که مطابق رابطه 4 بیان شد.

$$E_{Total} = E_{Solar} + E_{el} \quad (4)$$

که در آن انرژی مصرف‌شده برای خشک‌کردن محصول (J) و انرژی حرارتی تأمین شده به وسیله‌ی جمع‌کننده خورشیدی (J) هستند. انرژی خورشیدی مصرفی از رابطه 5 محاسبه گردید.

$$E_{Solar} = \int \dot{Q} dt \quad (5)$$

که در آن توان حرارتی تولید شده در جمع‌کننده (W) است که از رابطه 6 به دست می‌آید:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{oc} - T_{ic}) \quad (6)$$

که در آن، \dot{m} جرمی هوای عبوری (kg s^{-1})، C_p گرمای ویژه هوای عبوری ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) و T_{oc} و T_{ic} به ترتیب دمای خروجی و ورودی جمع‌کننده (K) می‌باشند. دبی جرمی هوای خروجی از رابطه 7 محاسبه گردید.

$$\dot{m} = \dot{V} \rho \quad (7)$$

که در آن چگالی هوا (kg m^{-3}) و نرخ حجمی هوای عبوری ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) می‌باشند. در نهایت انرژی مصرفی ویژه، با استفاده از رابطه 8 تعیین گردید.

$$SEC = \frac{E_{Total}}{W_c} \quad (8)$$

که در آن SEC انرژی مصرفی ویژه (J kg^{-1}) و جرم آب بخار شده از محصول در طول فرایند خشک شدن هستند.

2-3-2- تغییرات رنگ محصول

تغییرات کلی رنگ گل گاوزبان خشک شده ($E\Delta$) توسط رابطه 9 محاسبه شد. در این رابطه L_0 ، a_0 و b_0 پارامترهای رنگی گاوزبان تازه (خشک نشده) می‌باشد و (L پارامترهای

تیمارهای مختلف آزمایش و روش خشک‌کردن سنتی (خشک‌کردن در سایه) به 6 نفر ارزیاب حسی آموزش‌دیده (عطاران و متخصصین طب‌سستی) نشان داده شد و امتیاز داده شده آن‌ها به هر نمونه ثبت گردید. در این ارزیابی از ارزیابان خواسته شد امتیازی بین 1 تا 5 (بر اساس درجه مرغوبیت از لحاظ رنگ ظاهری نمونه‌ها) به هرکدام از نمونه‌ها اختصاص دهند. تحلیل این امتیازها درکنار داده‌های مربوط به فضای رنگی که با دستگاه رنگ سنج بدست آمده است، برای مطالعه تاثیر عوامل خشک شدن بر کیفیت رنگ محصول نهایی اهمیت دارد.

به منظور بررسی سنتیک خشک‌شدن محصول گل گاوزبان، رفتار محصول در حین از دست دادن رطوبت با استفاده از مدل‌های ریاضی مرتبط ارائه شده در پژوهش‌های پیشین (جدول 1) مقایسه گردید و از بین مدل‌های موجود مناسب‌ترین مدل براساس شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار کای-مربع (χ^2) انتخاب شد. برای این منظور پارامتر نسبت رطوبت¹ مطابق رابطه‌ی 1 بدست آمد.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

که در آن، M_t و M_e به ترتیب محتوای رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه، محتوای رطوبت اولیه و محتوای رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) می‌باشند که به دلیل کوچک بودن محتوای رطوبت تعادلی در مقایسه با مقدار اولیه و درحین فرایند آن، به طور معمول رابطه‌ی 1 به صورت رابطه‌ی 2 ساده‌سازی می‌گردد [17].

Table 1 Empirical models used to develop the kinetics of drying

Model name	Equation	Reference
Logaritmik	$MR = a \exp(-bt) + c$	[18]
Aghbashlo et al.	$MR = \exp\left(\frac{at}{1+bt}\right)$	[19]
Newton	$MR = \exp(-at)$	[20]
Page	$MR = \exp(-at^n)$	[21]
Verma	$MR = a \exp(-bt) + (1-a) \exp(-ct)$	[22]

a, b, c and n are constants

1. Moisture Ratio

ارزیابی عملکرد خشک‌کن، صفت‌های یادشده با استفاده از آزمون تجزیه واریانس و آزمون دانکن در سطح احتمال $p < 0/05$ توسط نرم‌افزار SPSS 19 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نمودارها با استفاده از نرم افزار MS-EXCEL 2016 رسم گردید. در بررسی سینتیک خشک شدن به منظور تعیین فراسنجه‌های آماری و ضرایب ثابت مربوط به مدل‌های تجربی خشک‌شدن از جعبه ابزار Curve Fitting در نرم افزار Matlab R2016a استفاده شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی تاثیر فاکتورهای مورد مطالعه بر

زمان خشک‌شدن

در جدول 2، شرایط محیطی در زمان خشک کردن گل گاوزبان در خشک‌کن خورشیدی مجهز به لامپ مادون قرمز نشان داده شده است. با توجه به انجام آزمایش‌ها در روزهای پیاپی در تابستان، می‌توان گفت که شرایط محیطی تا حدود زیادی برای آزمایش‌های مختلف یکسان بوده است.

Table 2 Ambient conditions during the test period.

Air flow (m^3s^{-1})	Parameter	Mean \pm SD		
		100 W	150 W	213 W
0.0025	Ambient temperature($^{\circ}C$)	40.0 \pm 2.5	39.0 \pm 4.0	39 \pm 3.5
	Solar radiation intensity ($W m^{-2}$)	963.3 \pm 89.2	834.3 \pm 14.5	951.7 \pm 93.5
0.005	Ambient temperature($^{\circ}C$)	39.0 \pm 3.0	39.0 \pm 3.0	40.0 \pm 1.0
	Solar radiation intensity ($W m^{-2}$)	907.8 \pm 47.8	930.4 \pm 33.5	982.9 \pm 43.1

معنادار گردید.

همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است، با افزایش توان لامپ مادون قرمز و دبی حجمی، زمان خشک شدن به طور معناداری کاهش یافت. به طوری که بیشترین زمان خشک شدن (95 دقیقه) در کاربرد توان 100 وات و دبی جریان هوای 0/0025 مترمکعب بر ثانیه و کمترین زمان خشک شدن (51 دقیقه) در توان 213 وات و دبی حجمی هوای 0/005 متر-مکعب بر ثانیه اندازه‌گیری گردید. بنابراین، تغییرات همزمان توان لامپ و دبی حجمی هوا بر سرعت خروج رطوبت از گل گاوزبان تاثیر دارد و با افزایش دبی حجمی هوا می‌توان از

a و b مربوط به رنگ محصول پس از خشک شدن است [23].

(9)

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - a_0)^2}$$

ارزش رنگی (C) از رابطه 10 محاسبه شد و معرف شدت رنگ یا اشباعیت می‌باشد.

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (10)$$

در این رابطه a و b پارامترهای رنگی گاوزبان خشک شده می‌باشند. پارامتر رنگ a در طیف رنگ قرمز-سبز قرار دارد. پارامتر رنگ b برای بیان بعد زرد-آبی به کار می‌رود. مقدار پارامتر رنگ L، برای نشان دادن روشنایی نمونه‌ها از تیره تا روشن به کار می‌رود.

2-4- آزمون‌های آماری و نرم افزارهای مورد

استفاده

در این پژوهش مطابق آزمایش فاکتوریل با طرح پایه کاملا تصادفی برای تحلیل انرژی مصرفی ویژه و زمان خشک‌شدن و در مورد صفت‌های مرتبط با رنگ و مقبولیت نمونه با توجه به وارد شدن نمونه شاهد در مقایسه‌ها، نمونه‌ها با استفاده از طرح کاملا تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به منظور

محتوای رطوبت اولیه گاوزبان به روش آون، 87 درصد مبنای تر تعیین گردید. نمونه‌های گاوزبان در دو دبی حجمی هوا (0/0025 و 0/005 متر مکعب بر ثانیه) و 3 توان لامپ مادون قرمز (100، 150 و 213 وات) در دستگاه خشک‌کن خورشیدی مجهز به لامپ مادون قرمز خشک گردید. در هر دو دبی هوای عبوری، در توان 213 سرعت کاهش رطوبت بیشتر بوده و بعد از آن مربوط به توان‌های 150 و 100 وات می‌باشد. نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان می‌دهد اثر دبی حجمی، توان لامپ مادون قرمز و اثر متقابل آن‌ها (دبی حجمی هوا \times توان لامپ مادون قرمز) بر زمان خشک شدن در سطح 1 درصد

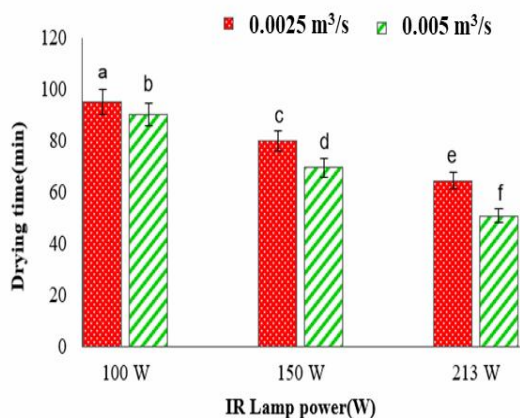


Fig 2 Mean comparison of drying time in different air flow rates and IR powers

3-2- بررسی مصرف انرژی

در فرایند خشک کردن گل گاوزبان با خشک کن خورشیدی مجهز به لامپ های مادون قرمز، انرژی های مصرف شده شامل انرژی الکتریکی (مکنده جریان هوا، لامپ های مادون قرمز) و انرژی خورشیدی می باشد. نتایج مصرف انرژی تیمارهای مختلف آزمایش، در شکل 3 نشان داده شده است. انرژی خورشیدی مصرفی، وابسته به دبی هوای عبوری از داخل جمع کننده و مدت زمان خشک شدن می باشد به طوری که در مجموع می توان گفت توان الکتریکی مصرف کننده ها، زمان و دبی هوا به طور مستقیم بر انرژی الکتریکی و خورشیدی تأثیر می گذارند. با توجه به شکل 3، می توان گفت که سهم انرژی خورشیدی از مجموع انرژی مصرفی، بین 48 تا 65 درصد بود.

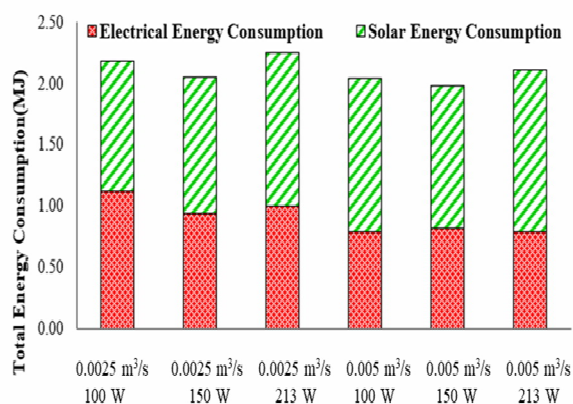


Fig 3 Solar and electrical energy consumption in different drying treatments

لامپ مادون قرمز با توان کمتر استفاده نمود و بالعکس. در این پژوهش زمان خشک شدن گاوزبان به روش سایه خشک 24 ساعت (1440 دقیقه) اندازه گیری گردید. به عبارت دیگر می توان گفت استفاده از خشک کن خورشیدی مجهز به لامپ مادون قرمز به طور قابل ملاحظه ای زمان خشک کردن را در مقایسه با روش سنتی (سایه خشک) کاهش داد. این نتایج توسط سایر محققین نیز بدست آمده است. در تحقیقی، با افزایش سرعت عبور هوا از 1 متر بر ثانیه به 2 متر بر ثانیه، زمان خشک شدن کلزا 4/3 درصد کاهش یافت [24]. نتایج بررسی خشک کن لایه نازک قارچ دکمه ای با ترکیب مادون قرمز - هوای داغ نشان داد که با افزایش توان لامپ (از 150 به 375 وات)، دما (از 50 به 70 درجه سلسیوس) و سرعت جریان هوا (از 1 به 3 متر بر ثانیه)، زمان خشک شدن به ترتیب 6/28، 7/42 و 2/15 درصد کاهش یافت [25]. نتایج پژوهشی دیگر حاکی از آن است که زمان خشک شدن پسته در یک خشک کن خورشیدی مجهز به لامپ مادون قرمز، با افزایش شدت تابش مادون قرمز از صفر به 0/14 وات بر سانتی متر مربع، حدود 50 درصد کم شد [26]. در تحقیق Beigi در سال 2018 بیان گردید که با افزایش توان مادون قرمز از 200 به 500 وات، زمان خشک شدن به کمتر از 50 درصد کاهش یافت [27]. در مجموع بالا بردن دبی هوای خشک کننده، در تابش های مختلف مادون قرمز، کاهش مصرف انرژی را به دنبال داشت که دلیل اصلی آن به کاهش زمان خشک شدن برمی گردد. به عبارت دیگر، اگر چه افزایش سرعت هوای عبوری از داخل جمع کننده های خورشیدی، بهبود بازده حرارتی و در نتیجه توان مفید تولیدی آن ها را به دنبال دارد [15] که می تواند منجر به افزایش مصرف انرژی در یک زمان ثابت گردد، اما در اثر کاهش زمان خشک شدن مجموع انرژی خورشیدی و الکتریکی کم شده است. افزایش سرعت هوای عبوری در یک خشک کن خورشیدی فتوولتائیک-گرمائی مجهز به پمپ حرارتی موجب کاهش انرژی مورد نیاز برای خشک شدن کلاله زعفران شد [28].

در خشک‌کردن با سامانه مادون قرمز بود [29]. پژوهش‌گران نشان دادند که با افزایش شدت مادون قرمز از 0/22 به 0/31 وات بر سانتی‌مترمربع، انرژی مورد نیاز برای خشک‌کردن دانه‌های انار کاهش و با افزایش بیشتر آن تا 0/49 وات بر سانتی‌مترمربع، مصرف انرژی افزایش می‌یابد [30]. در تحقیق دیگر Motevali و همکاران بیان کردند که با افزایش شدت مادون‌قرمز، بازده انرژی خشک‌شدن محصول افزایش می‌یابد [31]. سهم انرژی خورشیدی، در خشک کردن دانه‌های برنج با یک خشک‌کن بستر سیال خورشیدی با لامپ‌های مادون‌قرمز کمکی، بین 29 تا 53 درصد برآورد گردید. در این تحقیق کم‌ترین مقدار انرژی مصرفی ویژه حدود 30 مگاژول بر کیلوگرم گزارش شد [32]. در تحقیق مشابهی که در آن از یک خشک‌کن میکروویو پیوسته، برای خشک‌کردن برنج استفاده شده بود، انرژی ویژه مصرفی 16/32 مگاژول بر کیلوگرم بدست آمد [33].

3-3- ارزیابی پارامترهای رنگی

پارامترهای رنگ L, a و b در گاوزبان تازه به ترتیب 5/57 ± 5, 54 ± 5 و 8/67 ± 1/53 اندازه‌گیری گردید. میزان اشباعیت رنگ گاوزبان برابر با 54/69 بود. پارامتر رنگ a در گل گاوزبان خشک‌شده در طیف رنگ قرمز قرار داشت. مقادیر پارامتر رنگ b در گل گاوزبان خشک‌شده نشان می‌دهد که پارامتر b در محدوده رنگ آبی قرار دارد. مقدار اندازه‌گیری شده برای پارامتر L در نمونه خشک‌شده نسبت به نمونه تازه کاهش یافت که نشان دهنده تیره‌تر شدن رنگ گل گاوزبان فرایند خشک‌شدن است. به طور کلی در مقایسه با گل گاوزبان تازه، همه پارامترهای رنگ L, a و b در گل گاوزبان خشک‌شده کاهش یافتند. یعنی رنگ نمونه‌ها از نظر روشنایی، تیره‌تر شد و رنگ آبی در آن‌ها افزایش و رنگ قرمز کاهش یافت (شکل 5).

نتایج آزمون تجزیه واریانس اثر عامل‌های آزمایشی بر انرژی مصرفی ویژه در سطح معناداری ($p < 0/01$) تفاوت معنادار دارد. نتایج مقایسه میانگین‌ها در شکل 4 نشان می‌دهد کمترین میزان انرژی مصرفی ویژه (4/63 مگاژول بر کیلوگرم) و بیشترین انرژی مصرفی ویژه (5/26 مگاژول بر کیلوگرم) به ترتیب مربوط به شرایط خشک کردن در دبی حجمی هوا $0/005 \text{ m}^3/\text{s}$ + توان 150 وات لامپ مادون‌قرمز و دبی حجمی هوا $0/0025 \text{ m}^3/\text{s}$ + توان 213 وات لامپ مادون‌قرمز می‌باشد. بیشترین مصرف انرژی در این تیمار به دلیل افزایش زمان خشک شدن گاوزبان (64/67 دقیقه) و استفاده از بیشترین توان لامپ مادون‌قرمز بوده است.

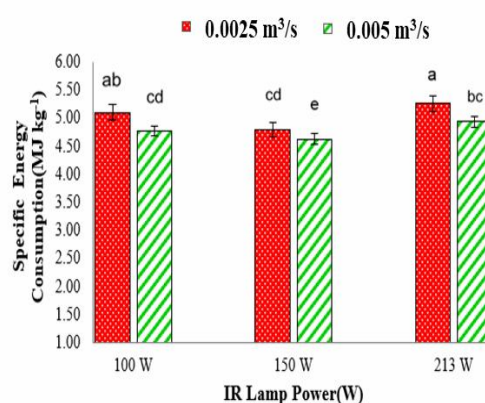


Fig 4 Mean comparison of specific energy consumption in different drying treatments

براساس یافته‌های تحقیق می‌توان گفت که با افزایش توان لامپ مادون قرمز از 100 تا 150 وات به دلیل کاهش زمان خشک‌شدن، انرژی مصرفی کاهش یافته است. در حالی که کاهش زمان خشک‌شدن در توان مادون‌قرمز وات نتوانسته افزایش توان لامپ را جبران کند و در مجموع انرژی مصرفی کل افزایش یافته است. در تحقیقی از یک خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز با هوای داغ برای خشک‌کردن سیب‌زمینی و هویج استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش انرژی مصرفی

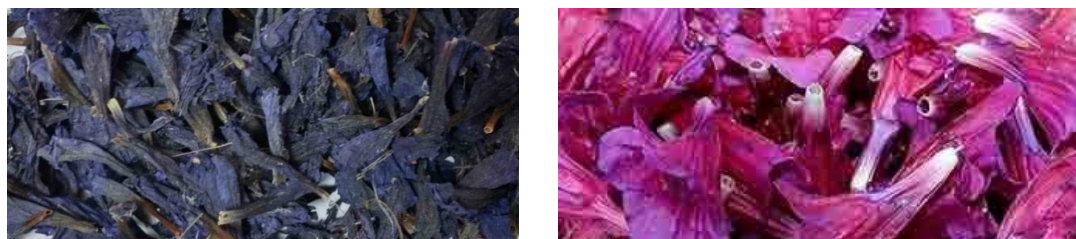


Fig 5 Color of fresh vs. dried *Echium*

افزایش یافت به طوری که در توان 213 وات و دبی هوا m^3 $0/005s^{-1}$ بیشترین تغییرات رنگ گل گاوزبان (45/39) مشاهده شد.

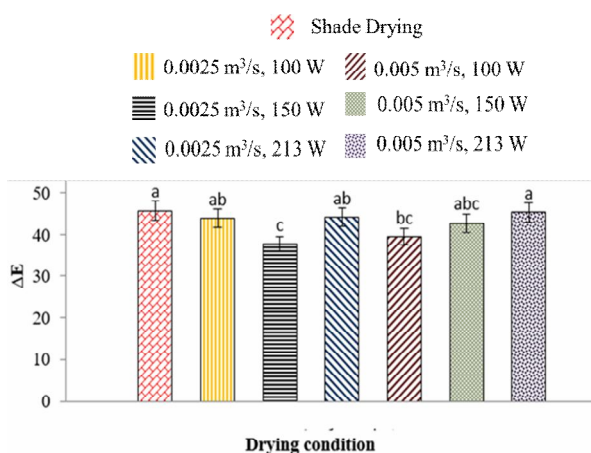


Fig 7 Mean comparison of color difference in sensory evaluation for all drying treatments in dryer vs. conventional method (Shade drying).

3-4- ارزیابی حسی رنگ

نمونه‌های گل گاوزبان خشک شده به روش سایه‌خشک به همراه نمونه‌های خشک‌شده توسط خشک‌کن خورشیدی با لامپ‌های مادون قرمز کمکی توسط 6 ارزیاب آموزش‌دیده (کارشناسان طب سنتی و عطاران باتجربه) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد در تیمارهای مختلف، بازارپسندی رنگ نمونه‌ها در سطح 5 درصد دارای تفاوت معنادار است ($p=0/011$).

بهترین رنگ (امتیاز 4/83 از 5) از نظر ارزیابان در خشک‌کردن در شرایط دبی حجمی هوا $0/005 m^3 s^{-1}$ و توان 213 وات لامپ مادون قرمز و نامطلوب‌ترین رنگ (امتیاز 3/67 از 5)، مربوط به خشک‌کردن در شرایط دبی حجمی هوا $m^3 s^{-1}$ $0/0025$ و توان 100 وات لامپ مادون قرمز شناخته شد. امتیاز رنگ از نظر ارزیابان در نمونه‌هایی که در سایه‌خشک شده بودند و نمونه‌هایی که در دستگاه خشک‌کن در شرایط دبی حجمی هوا $0/0025 m^3 s^{-1}$ + توان 213 وات لامپ مادون قرمز و دبی حجمی هوا $0/005 m^3 s^{-1}$ + توان 150 وات لامپ مادون قرمز خشک شده بودند، تفاوت معناداری نداشت (شکل 8).

نتایج آزمون تجزیه واریانس در بررسی تاثیر دبی حجمی هوا و توان لامپ مادون قرمز بر پارامترهای رنگ گل گاوزبان نشان می‌دهد عامل‌های اصلی و اثر متقابل آن‌ها (دبی حجمی هوا × توان لامپ مادون قرمز) بر پارامتر رنگ L در سطح 1 درصد معنادار می‌باشد اما بر پارامترهای رنگی a و b و اشباعیت رنگ در سطح 5 درصد معنادار نبود. تاثیر دبی حجمی هوا بر تغییرات رنگ گل گاوزبان معنادار نبود اما تاثیر توان لامپ مادون قرمز و اثر متقابل آن‌ها در سطح 5 درصد بر تغییرات رنگ گل گاوزبان معنادار می‌باشد.

در تغییر رنگ پارامتر L، هر دو پارامتر دبی حجمی هوا و هم توان لامپ مادون قرمز موثر هستند. همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است با افزایش توان لامپ مادون قرمز و دبی حجمی هوا، پارامتر رنگ L که نشان دهنده میزان روشنایی نمونه‌ها می‌باشد کاهش یافته است. به بیان دیگر با افزایش دبی حجمی هوا و توان لامپ، نمونه‌ها از نظر رنگ، تیره‌تر شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تغییر معناداری بین تیمار شاهد و سطوح بالای توان لامپ مادون قرمز در هر دو سطح دبی هوا وجود ندارد.

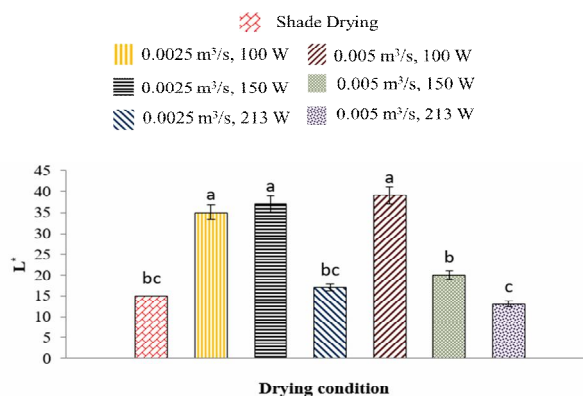


Fig 6 Mean comparison of L* in sensory evaluation for all drying treatments in dryer vs. conventional method (Shade drying).

پارامتر ΔE نشان دهنده تغییرات رنگ گل گاوزبان خشک‌شده نسبت به گل گاوزبان تازه می‌باشد. نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان‌دهنده تاثیر متقابل دبی حجمی هوا و توان لامپ مادون قرمز بر تغییرات رنگ گل گاوزبان می‌باشد. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، با افزایش توان لامپ مادون قرمز و دبی حجمی هوا، تغییرات رنگ به طور معناداری

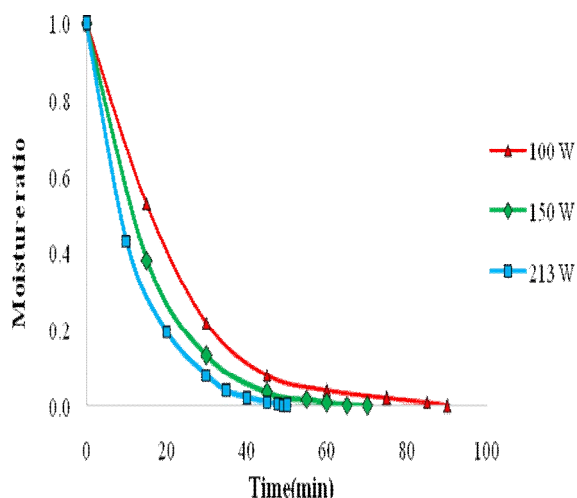


Fig 10 Variations of moisture ratio in different IR lamp power at $0.005 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ of air flowrate

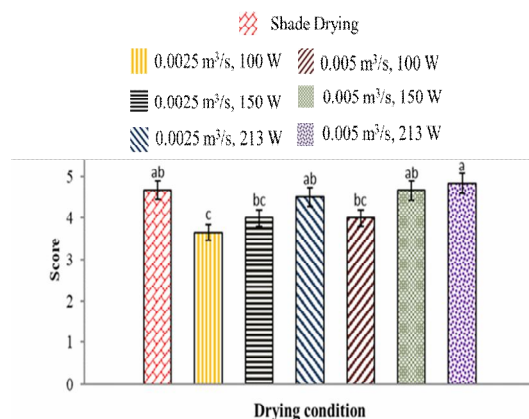


Fig 8 Mean comparison of color score in sensory evaluation for all drying treatments in dryer vs. conventional method (Shade drying)

همچنین، کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار کای مربع (χ^2) برای همه مدل‌های مورد برازش به جز مدل لگاریتمی کمتر از 0/02 و 0/0004 بود. نتایج نشان داد مدل پیچ دارای بالاترین R^2 و کمترین RMSE و χ^2 هست بنابراین این مدل برای بررسی فرایند خشک‌کردن گل گاوزبان با استفاده از خشک‌کن خورشیدی با سامانه مادون‌قرمز کمکی توصیه می‌شود و این مدل می‌تواند به خوبی داده‌های آزمایشگاهی را پیش بینی کند. جدول 4 ضرایب ثابت محاسبه شده برای مدل برازش شده مذکور را بیان می‌نماید. در تحقیق مشابهی، ناد و آبدانان مدل پیچ را برای خشک کردن گل گاوزبان با جریان هوای گرم پیشنهاد کردند [34]. به منظور مدل‌سازی گیاه برگ بو (*Laurusnobilis L*) در شرایط مختلف رطوبت نسبی و دمای هوای خشک کننده، از 15 مدل ریاضی استفاده گردید [35].

Table 3 The goodness of fit analysis using various statistical indices for different empirical models

Model name	Statistical index		
	R^2	RMSE	χ^2
Logarithmic	0.78	0.148	0.040
Aghbashlo, et al.	0.99	0.009	0.0001
Newton	0.99	0.018	0.0004
Page	0.99	0.006	0.00007
Verma	0.99	0.01	0.0004

3-5- مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن گل گاوزبان

نحوه تغییر نسبت رطوبت محصول در طول زمان خشک‌شدن داخل خشک‌کن خورشیدی مجهز به لامپ مادون‌قرمز در شکل‌های 9 و 10 آورده شده است.

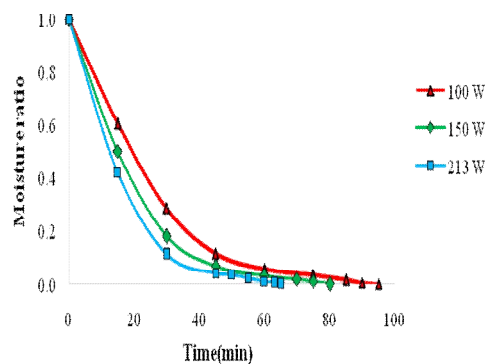


Fig 9 Variations of moisture ratio in different IR lamp power at $0.0025 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ of air flowrate

مقایسه آماری برازش مدل‌های مختلف بر میانگین داده‌های آزمایش در تیمارهای مختلف در جدول 3 مشاهده می‌گردد. با توجه به جدول، در همه مدل‌های تجربی به جز مدل لگاریتمی، مقدار ضریب تبیین (R^2) از 0/99 بیشتر بود.

Table 4 Nonlinear regression analysis and constant values for Page Model

Air flow (m ³ s ⁻¹)	IR lamp Power (W)	Statistical index			Model Coefficient	
		R ²	RMSE	χ ²	a	n
0.0025	100	0.99	0.0007	0.00007	0.02	1.28
	150	0.99	0.009	0.0001	0.03	1.23
	213	0.99	0.009	0.0001	0.03	1.21
0.005	100	0.99	0.006	0.00005	0.02	1.22
	150	0.99	0.004	0.00002	0.05	1.11
	213	0.99	0.009	0.00008	0.07	1.05
Mean	--	0.99	0.006	0.00007	0.04	1.18

5- منابع

- [1] Inta, A., Trisonthi, P., and Trisonthi, C. 2013. Analysis of traditional knowledge in medicinal plants used by Yuan in Thailand. *Journal of Ethnopharmacology*, 149(1): 344-351.
- [2] Hosseinpour Azad, N., Nematzadeh, G.A., Azadbakht, M., Kazemitabar, S., and Shokri, E. 2012. Investigation on fatty acids profile in two ecotypes of Iranian *Echium amoenum* Fisch & Mey. *Iranian journal of medicinal and aromatic plants*, 27(4): 587-595.
- [3] Chua, K. and Chou, S. 2003. Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*, 14(12): 519-528.
- [4] Doymaz, I. and Pala, M. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60(2): 125-130.
- [5] Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L., and Sarsavadia, P.N. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*, 27(6): 579-590.
- [6] Lakshmi, D.V.N., Muthukumar, P., Layek, A., and Nayak, P.K. 2019. Performance analyses of mixed mode forced convection solar dryer for drying of stevia leaves. *Solar Energy*, 188: 507-518.
- [7] Essalhi, H., Benchrif, M., Tadili, R., and Bargach, M.N. 2018. Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49: 58-64.
- [8] Lewicki, P.P. 2006. Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology*, 17(4): 153-163.
- [9] Pan, Z. and Atungulu, G.G., *Infrared heating for food and agricultural processing*. 2010: CRC Press.

در این تحقیق، مدل پیچ به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. در بررسی سینتیک خشک شدن ورقه‌های بادمجان در دماها و سرعت‌های مختلف هوای گرم عبوری، مدل پیچ از بین 8 مدل ریاضی مختلف، توصیه گردید [36]. برای توصیف خشک‌کردن برش‌های نازک لیمو ترش به روش تابش مادون - قرمز [37] و پورهی هویج در دماهای مختلف هوای خشک کننده [38]، نیز مدل پیچ پیشنهاد گردید.

4- نتیجه گیری

نتایج نشان داد توان لامپ‌های مادون‌قرمز، دبی حجمی هوا و اثر متقابل آن‌ها بر زمان خشک‌شدن گل گاوزبان به طور معنادار موثر می‌باشد ($p < 0/01$). مدت زمان خشک‌شدن گل گاوزبان در روش مرسوم سایه‌خشک 24 ساعت اندازه‌گیری گردید. در حالی که استفاده از خشک‌کن خورشیدی مورد بررسی، طولانی‌ترین زمان خشک شدن 100 دقیقه بود. با افزایش دبی حجمی هوا و توان لامپ این زمان کاهش یافت از بین مدل‌های ریاضی خشک‌کردن، مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها مراحل خشک‌شدن گل گاوزبان را بهتر دنبال کرد. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش، استفاده از روش خشک‌کردن خورشیدی با سامانه مادون‌قرمز کمکی می‌تواند در افزایش سرعت خشک‌کردن موثر باشد. بنابراین می‌توان از ترکیب روش خورشیدی و مادون قرمز به عنوان جایگزین روش سنتی برای خشک‌کردن سریع‌تر همراه با حفظ کیفیت رنگ گل گاوزبان و کاهش مصرف انرژی ویژه استفاده کرد. با در نظر گرفتن کمترین انرژی مصرفی و همچنین کمترین تفاوت رنگ نسبت به نمونه شاهد، بهترین روش خشک‌کردن در دبی حجمی هوا 0/005 مترمکعب بر ثانیه و توان 150 وات لامپ مادون‌قرمز در دستگاه خشک‌کن، تعیین شد.

- Transactions of the ASAE, 17(6): 1167-1168.
- [21] Agrawal, Y.C. and Singh, R.P. 1978. Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. Paper-American Society of Agricultural Engineers.
- [22] Verma, L.R., Bucklin, R., Endan, J., and Wratten, F. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. Transactions of the ASAE, 28(1): 296-0301.
- [23] Dorouzi, M., Morteza pour, H., Akhavan, H.-R., and Moghaddam, A.G. 2018. Tomato slices drying in a liquid desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system. Solar Energy, 162: 364-371.
- [24] Gazor, H.R. and Minaei, S. 2008. Influence of temperature and air velocity on the canola drying process and its quality. Journal of Agricultural Engineering Research, 9(1): 109-124.
- [25] Salehi, F., Kashaninejad, M., Sadeghi Mahoonak, A., and Ziaifar, A.M. 2017. Kinetics modeling of thin-layer drying of button mushroom in combined infrared-hot air dryer. Food Science and Technology, 13(61): 87-97.
- [26] Rekabi, M., Abasspour-Fard, M.H., and Morteza pour, H. 2017. Energy Consumption and Pistachio Drying Time in a Hybrid Solar-Infrared Drier. Journal of Agricultural Engineering, 39(2): 17-32.
- [27] Beigi, M. 2018. Effect of infrared drying power on dehydration characteristics, energy consumption, and quality attributes of common wormwood (*Artemisia absinthium* L.) leaves. Journal of Agricultural Science and Technology, 20(4): 709-718.
- [28] Morteza pour, H., Ghobadian, B., Minaei, S., and Khoshtaghaza, M.H. 2012. Saffron drying with a heat pump-assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer. Drying Technology, 30(6): 560-566.
- [29] Hebbar, H.U., Vishwanathan, K., and Ramesh, M. 2004. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. Journal of food engineering, 65(4): 557-563.
- [30] Motevali, A., Minaei, S., and Khoshtaghaza, M.H. 2011. Evaluation of energy consumption in different drying methods. Energy Conversion and Management, 52(2): 1192-1199.
- [31] Motevali, A., Jafari, H., and Hashemi, [10] Łechtańska, J.M., Szadzińska, J., and Kowalski, S.J. 2015. Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 98: 155-164.
- [11] Sui, Y., Yang, J., Ye, Q., Li, H., and Wang, H. 2014. Infrared, convective, and sequential infrared and convective drying of wine grape pomace. Drying Technology, 32(6): 686-694.
- [12] Ziaforoughi, A. and Esfahani, J.A. 2016. A salient reduction of energy consumption and drying time in a novel PV-solar collector-assisted intermittent infrared dryer. Solar Energy, 136: 428-436.
- [13] Aktaş, M., Şevik, S., Amini, A., and Khanlari, A. 2016. Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. Solar Energy, 137: 500-515.
- [14] Şevik, S., Aktaş, M., Dolgun, E.C., Arslan, E., and Tuncer, A.D. 2019. Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. Solar Energy, 180: 537-549.
- [15] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., *Solar engineering of thermal processes*. 2013: John Wiley & Sons. 346.
- [16] Farahnaky, A. and Afshari Jouybari, H., *Evaluation of the potential of Photoshop software for colorimetry of foods and its comparison with Hunter colorimeter, case study: color changes of Mazafati rutabs during accelerated ripening in 18th National Congress on Food Technology* 2008: Mashhad. p. 1-7.
- [17] Balbay, A., Kaya, Y., and Sahin, O. 2012. Drying of black cumin (*Nigella sativa*) in a microwave assisted drying system and modeling using extreme learning machine. Energy, 44(1): 352-357.
- [18] Karathanos, V.T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. Journal of Food Engineering, 39(4): 337-344.
- [19] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., and Samimi - Akhijahani, H. 2009. Evaluation of thin - layer drying models for describing drying kinetics of barberries (*Barberries vulgaris*). Journal of food process engineering, 32(2): 278-293.
- [20] Henderson, S. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation.

- 87-91.
- [35] Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., and Hepbasli, A. 2005. Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46(11): 1667-1679.
- [36] Akpınar, E.K. and Bicer, Y. 2005. Modelling of the drying of eggplants in thin - layers. *International journal of food science & technology*, 40(3): 273-281.
- [37] Yousefi, A.R., Ghasemian, N., and Salari, A. 2017. Infrared drying kinetics study of lime slices using hybrid GMDH-neural networks. *Innovative Food Technologies*, 5(1): 91-105.
- [38] Kumar, N., Sarkar, B., and Sharma, H. 2012. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. *Journal of food science and technology*, 49(1): 33-41.
- S.J. 2018. Effect of IR intensity and air temperature on exergy and energy at hybrid infrared-hot air dryer. *Chem Ind Chem Eng Q*, 24(1): 31-42.
- [32] Mehran, S., Nikian, M., Ghazi, M., Zareiforoush, H., and Bagheri, I. 2019. Experimental investigation and energy analysis of a solar-assisted fluidized-bed dryer including solar water heater and solar-powered infrared lamp for paddy grains drying. *Solar Energy*, 190: 167-184.
- [33] Jafari, H., Kalantari, D., and Azadbakht, M. 2018. Energy consumption and qualitative evaluation of a continuous band microwave dryer for rice paddy drying. *Energy*, 142: 647-654.
- [34] Nadi, F. and Abdanan, S. 2017. An investigation into the effect of drying conditions on kinetic drying of medicinal plant of *Echium amoenum*. *Int Med J*. 24:

Study on the drying kinetics, energy consumption and quality parameters of *Echiummoenum* in an IR-assisted solar dryer

TehranizadeKermani, N. ¹, Maharlooei, M. ^{2*}, Mortezapour, H. ³

1. Graduated MSc Students of Biosystems Engineering, ShahidBahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2. Assistant professor, Biosystems Engineering, ShahidBahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
3. Assistant professor, Biosystems Engineering, ShahidBahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

(Received: 2019/11/13 Accepted:2020/02/29)

In the present study, an infrared-assisted solar dryer was used to determine the drying kinetics, energy consumption and quality parameters evaluation of *Echiummoenum*. Experiments were conducted with two levels of drying air flow rate (0.0025 and 0.005 m³s⁻¹) and three levels of IR lamp power (100, 150 and 213 W). Drying time, energy consumption and evaluation of quality properties in different air flow rates and lamp powers were compared to the conventional method (shade drying). Five empirical models were fitted on the experimental data and the goodness of regression models were evaluated using coefficient of determination (R²), root mean square error (RMSE), and Chi square (χ²). Results of drying time in the different experiments showed highly significant differences respect to the conventional method (*p-value*<0.01). Also results showed that increasing the air flow rate and IR power caused a reduction of 37% and 17% in drying time, respectively. Best empirical model to describe the drying behavior was the Page model. The lowest specific energy consumptions (SEC) was 4.63 MJ kg⁻¹, which was occurred at the air flow rate and IR power of 0.005 m³s⁻¹ and 150 W and the highest SEC was 5.26 MJ kg⁻¹ and occurred at 0.0025 m³s⁻¹ of air flow rate and 213 W of IR lamp, respectively. Finally, the air flow rate of 0.005 m³s⁻¹ and the IR power of 150 W was recommended for *Echiummoenum* drying in the IR-ASD because of the fair energy consumption and the suitable product color.

Keywords: *Echiummoenum*, Specific Energy Consumption, Drying, Infrared, Color properties, Sensory evaluation

*Corresponding Author E-Mail Address: maharlooei@uk.ac.ir