

مقاله پژوهشی

تحلیل انرژی و انرژی یک خشک‌کن خورشیدی با دو انباره گرمایی برای خشک‌کردن نعنای فلفلی

محسن مختاریان^{۱*}، احمد کلباسی اشتری^۲

۱. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲. دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۲۸، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۶/۱۱، تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۱۴)

چکیده

سه روش خشک‌کردن خورشیدی، آفتابی و سایه جهت کاهش رطوبت نعنای فلفلی از ۸۷٪ تا ۷٪ (~) (بر مبنای تر) مطالعه گردید. در حالی که افزایش دمای (ΔT) هوای محیط در روش آفتابی در اثر جذب انرژی روزانه خورشید (با شدت $I_{ave}=957 \text{ W/m}^2$) به حدود 4°C رسید، این افزایش دما در روش خورشیدی پس از عبور هوا از میان جمع‌کننده انرژی (با سطح $1/26 \text{ m}^2$) به 18°C رسید. با توجه به متوسط شدت تابش در روش خورشیدی (روزانه 860 W/m^2) میزان آنتالپی هوای گرم‌کن تا ۴۰٪ افزایش یافت. مقدار مصرف انرژی برای خشک‌کردن هر کیلوگرم نعنای فلفلی در خشک‌کن خورشیدی به 80 W/kg رسید که با توجه به زمان کوتاه این روش (۵ ساعت) فقط ۱۶٪ از کل انرژی ورودی به محفظه خشک‌کن صرف افزایش گرمای محسوس و تبخیر آب از محصول گردید. انرژی ورودی و خروجی خشک‌کن خورشیدی برای خشک‌کردن از نعنای فلفلی به ترتیب ۲۴٪ کاهش و ۳۸٪ افزایش یافت و مقدار کل اتلاف حرارتی (برای اتصالات و بدنه دستگاه) در طی دوره خشک‌کردن خورشیدی کم‌تر از ۴٪ از انرژی کل ورودی به خشک‌کن رسید. چون انرژی مصرفی برای خشک‌کردن از نعنای فلفلی با روش خورشیدی حدود ۵۰٪ انرژی مصرفی در روش‌های آفتابی و سایه بوده امکان خشک‌کردن نعنای فلفلی تازه و رسانیدن آن تا ۷٪ رطوبت تا دو برابر ظرفیت در این روش فراهم گردید.

واژه‌های کلیدی: نعنای فلفلی، خشک‌کن، انرژی، انرژی، دمای هوا.

۱. مقدمه

نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) از جمله گیاهان دارویی است که مصارف گسترده‌ای در صنایع دارویی، غذایی و بهداشتی دارد [۱]. طبق نتایج سازمان خواروبار کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) تولید نعناع فلفلی در سال ۲۰۱۶، ۱۰۶۲۵۳ تن گزارش گردید که بیش‌ترین سهم تولید را کشورهای مراکش (۹۲/۶۶٪) و آرژانتین (۶/۶۷٪) به خود اختصاص داده‌اند [۲]. برگ‌های خشک و تازه نعناع فلفلی در خوشبو کردن تنفس، نوشیدنی‌ها، ضدعفونی‌کننده دهان (دهان شویه)، خمیردندان، نوشیدنی‌ها، زله‌ها، شربت‌ها، بستنی و شکلات نعناعی به کار می‌رود [۱]. یکی از مراحل اصلی و رایج فراوری پس از برداشت اندام‌های گیاهی جمع‌آوری شده (به‌خصوص نعناع فلفلی) عملیات خشک کردن است، به طوری که تأثیر بارزی روی ترکیبات فرار موجود در اسانس این محصولات دارد [۱]. خشک کردن اندام‌های گیاهی با مزایایی چون افزایش ماندگاری، کاهش یا متوقف کردن فعالیت آنزیم‌ها و میکروارگانیزم‌ها، امکان حمل‌ونقل گیاه دارویی به اقصی نقاط دنیا (چون تمام دنیا رویشگاه همه گیاهان دارویی نیستند) همراه است [۳]. به علت رسانش حرارتی پائین محصولات کشاورزی، انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی این محصولات به کندی صورت می‌گیرد. به همین دلیل خشک کردن آن‌ها نیازمند مصرف انرژی بالایی است. همچنین با انتخاب روش مناسب خشک کردن با کاهش زمان خشک کردن می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، سبب کاهش تغییرات نامطلوب در محصول نیز گردید [۴]. در حال حاضر از دو روش سنتی (پهن کردن در معرض آفتاب یا سایه) و صنعتی (خشک‌کن‌های جابه‌جایی هوای داغ با سیستم گرمایشی مشعل یا گرم‌کن الکتریکی) برای خشک کردن گیاهان دارویی استفاده می‌شود. به طور کلی، این روش‌ها با محدودیت‌های چون طولانی بودن زمان خشک کردن، حمله حشرات و پرنده‌گان، گرد و غبار و ریزش باران، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا، مصرف انرژی بالا (به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی)، تجمع گازهای گلخانه‌ای در جو و به دنبال آن افزایش دمای کره زمین و آلودگی‌های زیست محیطی همراه هستند [۵]. بنابراین استفاده از خشک‌کنی که ضمن استفاده از انرژی تابشی خورشید جهت خشک کردن گیاهان دارویی، قادر باشد زمان خشک شدن را کاهش داده و سبب بهبود کیفیت آن‌ها شود (مانند کاهش میزان تخریب ترکیبات مؤثره شامل اسانس،

ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و فنولی)، ضروری و مناسب به نظر می‌رسد. در این راستا استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی به‌عنوان یک راه حل جدید مورد توجه قرار گرفته و به صورت فزاینده‌ای در حال رشد است. این نوع خشک‌کن‌ها براساس عبور هوای گرم شده در جمع‌کننده خورشیدی (کلکتور یا انباره گرمایی) از روی محصول عمل می‌کنند و در مقایسه با خشک‌کن‌های صنعتی دارای بازده انرژی قابل مقایسه بوده و در مناطقی که دارای ساعات تابش بالا در فصل برداشت هستند، به سادگی می‌توانند جانشین خشک‌کردن به روش سنتی و صنعتی گردند [۶].

با افزایش مصرف انرژی، تحلیل انرژی و انرژی (حداکثر کار مفیدی است که از مقدار مشخصی از انرژی موجود یا از جریانی از مواد به دست می‌آید) در رأس تحقیقات ترمودینامیکی قرار گرفته است. در تحلیل انرژی، هدف اساسی تعیین محل و مقدار تولید بازگشت‌ناپذیری طی فرایندهای مختلف چرخه ترمودینامیکی و عوامل مؤثر بر تولید این بازگشت‌ناپذیری است. از این طریق، علاوه بر ارزیابی کارایی اجزای مختلف چرخه ترمودینامیکی، راه‌های افزایش راندمان چرخه نیز شناسایی می‌شود [۵].

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه خشک کردن خورشیدی گیاهان دارویی منتشر شده که در ادامه به ذکر چند مورد پرداخته می‌شود. سلام و همکاران خشک کردن خورشیدی گیاه نعناع کامل را با یک خشک‌کن خورشیدی (در دو حالت مستقیم و غیرمستقیم) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که آهنگ خشک کردن نعناع در شرایط جابه‌جایی هوای اجباری (به ویژه در ساعات اولیه خشک کردن) بالاتر از جابه‌جایی طبیعی بود [۷]. سیپلین و همکاران استفاده از کلکتور خورشیدی هیبریدی را در فرایند خشک کردن گیاه دارویی بابونه (*Leonurus cardiaca*L.) مطالعه نمودند. آن‌ها بیان نمودند که با به‌کارگیری سیستم ذخیره‌کننده انرژی می‌توان تداوم خشک کردن را طی روز برقرار نمود. آن‌ها دمای هوای محیط را از ۱۶ تا ۳۰°C افزایش دادند که در این شرایط میزان تابش خورشید $380-400 \text{ W/m}^2$ بود. آن‌ها گزارش نمودند که برای تداوم خشک کردن در طی شب، میزان $99/9 \text{ MJ}$ انرژی بایستی در تانک آب ذخیره شود [۸]. سویک یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به پمپ حرارتی را در شرایط آب و هوایی گوناگون برای

قضاوت کلی در رابطه با حداکثر کار مفید سامانه، از قانون دوم ترمودینامیک (یعنی محاسبه انرژی) استفاده گردید.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. آماده‌سازی ماده اولیه

نعناع فلفلی به‌عنوان ماده خام اولیه به صورت روزانه از یکی از مزارع اطراف سبزوار (شهرستان جوبین) جمع‌آوری گردید. قبل از خشک کردن، ابتدا برگ‌ها از ساقه جدا و برگ‌های پژمرده و خراب از سایر برگ‌ها جداسازی شد. جهت کاهش سرعت خروج رطوبت سطحی و پژمردگی، برگ‌های تازه نعنای فلفلی در کیسه‌های پلاستیکی از جنس پلی اتیلن بسته‌بندی شدند. سپس تا زمان شروع آزمایشات در یخچال در دمای 4°C نگهداری شد [۱].

۲.۲. مشخصات خشک‌کن

در این مطالعه یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به کلکتور (جمع‌کننده) چندگذر طراحی و ساخته شد. خشک‌کن طراحی شده دارای کلکتور، محفظه خشک‌کردن، فن سانتریفوژ، اتصالات و لوله‌های رابط، کامپیوتر، حسگر و سامانه کنترل الکترونیکی می‌باشد (شکل ۱).

مشخصات ساختاری خشک‌کن در جدول (۱) آورده شده است. شیب کلکتور و نحوه قرارگیری آن توسط رابطه (۱) تعیین گردید [۵]:

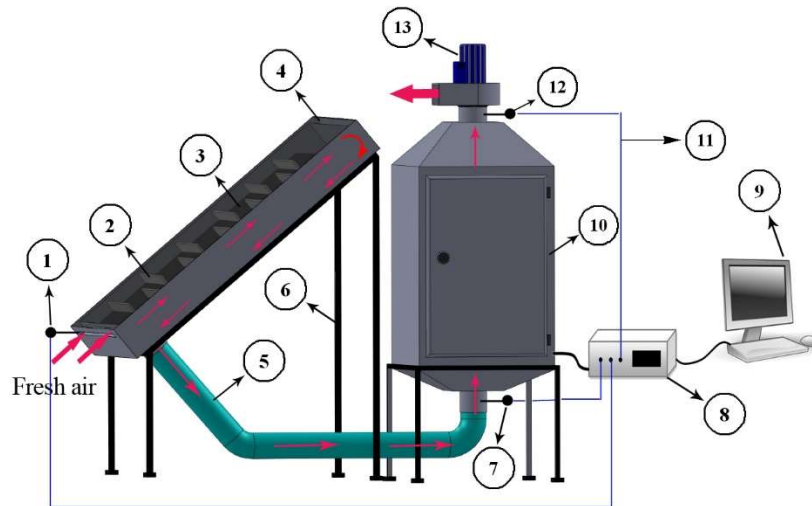
$$\beta = (\Phi - \delta) = \left(\Phi - 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \right) \quad (1)$$

در معادله (۱)، θ زاویه بین کلکتور خورشیدی و صفحه افق (درجه)، Φ عرض جغرافیایی (درجه)، δ زاویه میل یا انحراف (درجه) و N تعداد روز که در ۱ ژانویه $N=1$ و در ۳۱ دسامبر $N=365$ است.

بدین ترتیب، برای دریافت حداکثر انرژی تابشی خورشیدی، کلکتور به صورت زاویه‌دار با شیب 40° درجه رو به سمت جنوب قرار گرفت. جهت تعیین شدت تابش خورشید از پیرانومتر نصب شده در ایستگاه هواشناسی این منطقه (Theodor Friedrichs & Co, Typ 6006.0000, S/N 0408, Germany) استفاده گردید.

محصولات کشاورزی مختلف (گوجه‌فرنگی، توت‌فرنگی، نعنای و جعفری) مطالعه نمود. نتایج نشان داد که ضریب کارایی کلی خشک‌کن به ترتیب برای این محصولات $1/96$ ، $2/27$ ، $2/28$ و $2/17$ ٪ محاسبه شد. میانگین کارایی حرارتی کلکتور بین $79-16$ ٪ و نسبت مصرف انرژی بین $48-0/19$ محاسبه شد [۹]. ال-سیبا و همکاران یک خشک‌کن خورشیدی جابه‌جایی هوای اجباری غیرمستقیم را برای خشک کردن آویشن و نعنای مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که مدت زمان خشک کردن برای آویشن و نعنای به ترتیب 34 و $5h$ به طول انجامید [۱۰]. رودریگوز و همکاران رفتار خشک کردن آویشن را در دامنه دمایی 40°C تا 70°C و سرعت جریان هوا 1 m/s مورد بررسی قرار دادند. مقدار ضریب انتشار رطوبت برای آویشن بین $10^{-5} \times 3/68$ تا $10^{-4} \times 2/12$ m^2/s تعیین شد. هم‌چنین تابعیت انتشار رطوبت با دما توسط معادله آرنیوس بررسی و مقدار انرژی فعال‌سازی $49/42 \text{ kJ/mol}$ محاسبه شد [۱۱]. آکپینار خشک کردن برگ نعنای در یک خشک‌کن خورشیدی را مطالعه نمود. نتایج نشان داد که نسبت مصرف انرژی خشک‌کن کابینتی در دامنه $7/826$ تا $46/285$ ٪ متغیر بود. مقادیر کارایی انرژی نیز در دامنه $34/760$ تا $87/717$ ٪ تغییر نمود [۱۲].

با توجه به مطالب فوق مشخص شد که یکی از مراحل اصلی فراوری پس از برداشت محصولات کشاورزی خشک کردن است. به‌طور تقریبی این فرایند (در صورت خشک کردن به صورت صنعتی) هزینه‌برترین بخش فراوری محصولات کشاورزی است (به دلیل مصرف انرژی بالا جهت حذف آب از اندام‌های گیاهی). به منظور کاهش هزینه‌های فراوری محصولات کشاورزی و نیز استفاده بهینه از منابع انرژی سبز و دوستار محیط‌زیست (انرژی خورشیدی)، در این پژوهش یک خشک‌کن خورشیدی با انبساط گرمایی مجهز به مانع (تیغه) و با عبور مضاعف هوا، طراحی و ساخته شد و نتایج به‌دست آمده با روش‌های سنتی رایج (خشک کردن در معرض تابش مستقیم خورشید و خشک کردن در سایه) مقایسه گردید. جهت ارزیابی سامانه طراحی شده، پارامترهای ترمودینامیکی خشک‌کن (انرژی و انرژی) محاسبه و روند تغییرات آن‌ها طی فرایند خشک کردن پایش گردید. با توجه به این‌که با قانون اول ترمودینامیک (یعنی محاسبه انرژی) نمی‌توان میزان کیفیت انرژی را تحلیل نمود، بنابراین جهت



شکل (۱) ساختار شماتیک خشک‌کن خورشیدی طراحی شده برای خشک‌کردن نعناع لعلی، (۱) حسگر کنترل‌کننده دما و رطوبت نسبی هوای ورودی به کلکتور، (۲) تیغه، (۳) صفحه جاذب، (۴) کلکتور خورشیدی چندگذر، (۵) اتصالات و لوله‌های رابط، (۶) پایه (شاسی) نگه‌دارنده کلکتور و محفظه خشک‌کن، (۷) حسگر کنترل‌کننده دما و رطوبت نسبی هوای ورودی به خشک‌کن، (۸) دیتالاگر، (۹) کامپیوتر، (۱۰) محفظه خشک‌کن، (۱۱) سیم‌های رابط، (۱۲) حسگر کنترل‌کننده دما و رطوبت نسبی هوای خروجی از خشک‌کن و (۱۳) فن سانتریفوژ

Fig 1. Schematic structure of designed solar drying system for peppermint drying: (1) T & RH sensors for controlling inlet air in solar collector, (2) obstacles, (3) heat absorber plate, (4) double-passed solar collector, (5) connecting pipes and fittings, (6) stands for holding solar collector & drying chamber, (7) T & RH sensors for controlling inlet air in drying chamber, (8) data logger, (9) computer, (10) drying chamber, (11) wire connection, (12) T & RH sensors for controlling outlet air, (13) centrifugal fan

جدول (۱) مشخصات خشک‌کن خورشیدی طراحی شده برای خشک‌کردن نعنای فلفلی.

Table 1 Specification of the designed solar dryer for peppermint drying.

مشخصات Specification	پارامتر/بخش Parameter/part	مشخصات Specification	پارامتر/بخش Parameter/part
ورق گالوانیزه ضخامت 0.6 mm	جنس محفظه خشک‌کن Dryer chamber material	ورق MDF به ضخامت 0.8 و 1.6 cm	جنس بدنه کلکتور Collector body material
m0.65×m0.65×m1	ابعاد محفظه (طول×عرض×ارتفاع) Chamber dimensions (length×width×height)	m0.17×m0.95×m1.50	ابعاد کلکتور (طول×عرض×ارتفاع) Collector dimensions (length×width×height)
5 عدد	تعداد سینی Number of tray	چندگذر-مشکی مات	نوع و رنگ صفحه جاذب Type & absorber plate color
m0.04×m0.59×m0.59	ابعاد سینی (طول×عرض×ارتفاع) Tray dimensions (length×width×height)	ورق آلومینیوم به ضخامت 1.1 mm	جنس صفحه جاذب Absorber plate material
فن سانتریفوژ 0.5 hp/2800 rpm	سیستم گردش هوا در خشک‌کن Air recycling system in dryer	شیشه سفید به ضخامت 4 mm	پوشش روی صفحه جاذب Cover on absorber plate
AM2303	حسگر دما و رطوبت نسبی RH & T sensor	صفر درجه	شیب صفحه جاذب در کلکتور Angle of absorber plate in collector
40- تا 125°C	محدوده دمایی ثبت حسگر Range of T recording sensor	~m1.26 ^۲	سطح صفحه جاذب Area of absorber plate
0.1٪ تا 99.9٪	محدوده RH ثبت حسگر Range of RH recording sensor	ورق گالوانیزه/به ترتیب 50 cm و 4 cm	جنس/طول و ارتفاع تیغه‌ها Material/length & height of fins
عرض جغرافیایی 36°13'N	موقعیت جغرافیایی آزمون دستگاه Equipment test location	8 تیغه/15 cm	تعداد/فاصله تیغه‌ها بر روی صفحه جاذب Number/distance of fins on absorber plate
طول جغرافیایی 57°37'E	موقعیت جغرافیایی آزمون دستگاه Equipment test location	7 تیغه/15 cm	تعداد/فاصله تیغه‌ها در زیر صفحه جاذب Number/distance of fins under absorber plate
8:30 صبح تا 15 بعدازظهر	ساعت داده‌برداری Data recording hours	پشم شیشه به ضخامت 2.5 cm	نوع عایق حرارتی و ضخامت Type of thermal insulation & thickness

Memmert، آلمان) در دمای ۱۰۵°C به مدت ۲۴ h تعیین شد [۱۳].

۴.۲. تحلیل انرژی

طبق قانون اول ترمودینامیک، انرژی نه خلق و نه نابود شده بلکه از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌شود. معادله کلی بقای انرژی به شکل ریاضی به صورت زیر بیان می‌شود [۵، ۱۴]:

$$\sum E_i = \sum E_o + \Delta E_{sys} \quad (2)$$

۳.۲. روش‌های خشک‌کردن

برای خشک‌کردن نعنای فلفلی از روش‌های مختلفی استفاده گردید که مشخصات هر یک از این روش‌ها در جدول (۲) آورده شده است. قبل از شروع خشک‌کردن به منظور تعدیل دمایی نعنای فلفلی با محیط، نمونه‌های آزمایشی، به مدت ۲ h در دمای محیط قرار گرفتند. لازم به ذکر است که فرایند خشک‌کردن نعنای فلفلی تا رسیدن به رطوبت نهایی حدوداً ۷ درصد (مبنای تر) ادامه یافت. رطوبت نهایی به روش AOAC (شماره ۹۳۴/۰۶، توسط آون جابه‌جایی هوای داغ (مدل ۴۰۰ PA UNE، شرکت

جدول (۲) مشخصات روش‌های مختلف خشک کردن نعنای فلفلی.

Table 2 Specification of different drying methods of peppermint.

روش III*	روش II*	روش I*	پارامتر Parameter
2.5	2.5	2.5	وزن نعنای فلفلی تازه (kg) Weight of fresh peppermint (kg)
2	2	2	ضخامت بستر نعنای فلفلی (cm) Thickness bed of peppermint (cm)
1.4	1.4	1.4	تراکم جرمی (kg/m ^۳) Mass density (kg/m ^۳)
-	957	860	متوسط شدت تابش خورشید (W/m ^۲) Average of sun radiation (W/m ^۲)
2.98	0	-	متوسط سرعت باد (m/s) Average of wind velocity (m/s)
32.66	29.06	56.40	متوسط دمای خشک کردن (°C) Average of drying T (°C)
12.64	23.94	10.17	متوسط رطوبت نسبی (%) Average of RH (%)

* خشک کردن خورشیدی، (** خشک کردن سنتی در آفتاب و (***) خشک کردن سنتی در سایه.

شدن انجام نمی‌شود ($h_i = h_o$)، بنابراین می‌توان معادله (۶) را به صورت زیر بازنویسی نمود [۱۴ و ۱۵]:

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_{da,i} h_i + \dot{Q} = \sum_{o=1}^n \dot{m}_{da,o} h_o \quad (7)$$

با توجه به برابر بودن شدت جریان هوای ورودی و خروجی از خشک‌کن خورشیدی ($\dot{m}_{da,i} = \dot{m}_{da,o} = \dot{m}_{da}$) می‌توان معادله (۷) را به صورت زیر کاهش داد و از این معادله، برای تغییرات انرژی سامانه خورشیدی استفاده نمود [۱۵].

$$\dot{Q} = \dot{m}_{da} (h_o - h_i) \quad (8)$$

نسبت مصرف انرژی (EUR) در محفظه خشک‌کن به صورت زیر محاسبه شد [۱۵]:

$$EUR = \frac{\dot{m}_{da} (h_{dc,i} - h_{dc,o})}{\dot{m}_{da} c_{p,da} (T_{dc,i} - T_{col,i})} = \frac{\dot{m}_{da} (h_{dc,i} - h_{dc,o})}{\dot{m}_{da} (h_{dc,i} - h_{col,i})} \quad (9)$$

آنتالپی هوای ورودی (یا خروجی از) به محفظه خشک‌کن و نیز آنتالپی هوای ورودی به کلکتور (هوای محیط) به ترتیب توسط معادله‌های ۱۲-۱۰ قابل محاسبه هستند [۱۴، ۱۵]:

$$h_{dc,i} = 1.005(T_{dc,i} - T_0) + w_{dc,i} (2501.4 + 1.88(T_{dc,i} - T_0)) \quad (10)$$

معادله فوق می‌تواند در واحد زمان نیز نوشته شود [۱۴]:

$$\sum \dot{E}_i = \sum \dot{E}_o + \Delta \dot{E}_{sys} \quad (3)$$

$$\sum \dot{E}_i - \sum \dot{E}_o = \Delta \dot{E}_{sys} = \frac{dE_{sys}}{dt} \quad (4)$$

برای یک سیستم پایا انرژی با زمان تغییر نمی‌کند ($\Delta \dot{E}_{sys} = 0$)، بنابراین موازنه انرژی برای یک سیستم پایا به صورت زیر اصلاح می‌شود [۱۴]:

$$\dot{E}_i = \dot{E}_o \quad (5)$$

موازنه انرژی کل در یک سیستم باز تحت شرایط پایا به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_{da,i} (h_i + \frac{u_i^2}{2} + gz_i) + \dot{Q} = \sum_{o=1}^n \dot{m}_{da,o} (h_o + \frac{u_o^2}{2} + gz_o) + \dot{W} \quad (6)$$

نظر به این‌که، کار مکانیکی در خشک‌کن خورشیدی صورت نگرفته، بنابراین $\dot{W} = 0$ ، همچنین با توجه به این‌که طی خشک‌کردن، حرکت و جابه‌جایی محصول وجود ندارد، مؤلفه‌های

انرژی سینتیک (جنبشی) یعنی $\frac{u_i^2}{2}$ و $\frac{u_o^2}{2}$ از معادله (۶) حذف می‌گردد. به علاوه، با توجه به این‌که، هیچ‌گونه جابه‌جایی فیزیکی

(تغییر ارتفاع) نسبت به سطح مبنا، روی نعنای در حال خشک

$$\dot{V}_a = A\bar{u} \quad (18)$$

در معادله‌های (۱۶) تا (۱۸)، \dot{V} شدت جریان حجمی هوا در (m^3/s) ، u حجم مخصوص هوا (m^3/kg) و A سطح (m^2) است [۱۴، ۵].

لازم به ذکر است که بعد از انجام محاسبات، مقدار سرعت جریان هوا (توسط بادسنج آلمانی مدل TESTO۴۱۷، تعیین شد) و شدت جریان جرمی هوا به ترتیب معادل $۳/۵ m/s$ و $۰/۰۳۳ kg/s$ در نظر گرفته شدند.

۵.۲. تحلیل اگزرژی

اگزرژی معیاری است که کیفیت و کمیت انرژی را بیان نموده و اظهار می‌نماید که فرایند واقعی در راستای کاهش کیفیت انرژی به وقوع می‌پیوندد. تحلیل اگزرژی فرایند خشک کردن نعنای فلفلی براساس قانون دوم ترمودینامیک انجام شد. قانون دوم ترمودینامیک بیان می‌کند که بخشی از اگزرژی ورودی به یک سامانه گرمایشی (توسط تابش خورشیدی، سوخت فسیلی، برق و غیره)، به دلیل برگشت‌ناپذیر بودن در داخل سامانه نابود می‌شود. از معادله (۱۹) برای تعیین اگزرژی در محفظه خشک کن استفاده شد [۱۵، ۵]:

$$\dot{E}x = \dot{m}_{da} c_{p,da} [(T - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T}{T_\infty}] \quad (19)$$

در معادله (۱۹)، E_x اگزرژی (kJ/s) یا (kW) و c_p گرمای ویژه هوا $(kJ/kg K)$ است. اگزرژی درون‌ریز و برون‌ریز محفظه خشک‌کن، به ترتیب توسط معادله‌های (۲۰) و (۲۱) محاسبه شد [۱۵، ۵]:

$$\dot{E}x_{dc,i} = \dot{m}_{da} c_{p,da,i} [(T_{dc,i} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{dc,i}}{T_\infty}] \quad (20)$$

$$\dot{E}x_{dc,o} = \dot{m}_{da} c_{p,da,o} [(T_{dc,o} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{dc,o}}{T_\infty}] \quad (21)$$

گرمای ویژه یاد شده در معادله‌های (۲۰) و (۲۱) توسط رابطه (۲۲) محاسبه شد [۱۷]:

$$c_{p,da} = 1.0029 + 5.4 \times 10^{-5} T_{dc} \quad (22)$$

با توجه به این‌که، اختلاف بین حداکثر کار و کار مفید، به عنوان

$$h_{dc,o} = 1.005(T_{dc,o} - T_0) + w_{dc,o}(2501.4 + 1.88(T_{dc,o} - T_0)) \quad (11)$$

$$h_{col,i} = 1.005(T_{col,i} - T_0) + w_{col,i}(2501.4 + 1.88(T_{col,i} - T_0)) \quad (12)$$

در معادله‌های ۱۲-۲، E انرژی (kJ/s) ، t زمان (s) ، \bar{u} سرعت میانگین هوا (m/s) ، \dot{m} شدت جریان جرمی هوای (kg/s) ، h آنتالپی (kJ/kg) ، g شتاب گرانش $(۹/۸ m/s^2)$ ، z ارتفاع از سطح مبنا (m) ، \dot{Q} انرژی حرارتی (kJ/s) ، \dot{W} کار مکانیکی (kJ/s) ، T دمای مطلق (K) ، w نسبت رطوبت هوا $(kgH_2O/kgDa)$ ، c_p گرمای ویژه هوا $(kJ/kg K)$ و عدد $۲۵۰۱/۴ kJ/kg$ گرمای نهان تبخیر آب است.

معادله (۱۳) جهت تعیین نسبت رطوبت (رطوبت مطلق) یاد شده در معادله‌های ۱۲-۱۰ به کار رفت [۱۴، ۱۵]:

$$w = 0.622 \frac{\phi P_{vs}}{P_{sur} - \phi P_{vs}} \quad (13)$$

در معادله (۱۳)، ϕ رطوبت نسبی هوا $(/)$ ، P_{vs} فشار بخار اشباع (kPa) و P_{sur} فشار محیط (در سبزواری $۹۰/۱۱۸ kPa$) است.

معادله‌های (۱۴) و (۱۵) نیز به ترتیب برای تعیین فشار بخار اشباع و فشار محیط که هر دو در معادله (۱۳) به کار رفته، استفاده شد [۱۶، ۵]:

$$P_{vs} = 0.1 \exp(27.0214 - \frac{6887}{T_{abs}} - 5.31 \ln(\frac{T_{abs}}{273.16})) \quad (14)$$

$$P_{sur} = 1.01325 \times 10^5 (1 - 2.25577 \times 10^{-5} \times Z)^{5.2559} \quad (15)$$

در معادله (۱۵)، Z ارتفاع از سطح دریا (در سبزواری $۹۷۷/۶ m$) است. معادله (۱۶) برای تعیین شدت جریان جرمی هوای استفاده شد [۱۴، ۵]:

$$\dot{m}_{da} = \frac{\dot{V}_a}{v} \quad (16)$$

سرانجام، معادله‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب برای محاسبه حجم مخصوص و شدت جریان حجمی هوای، اشاره شده در معادله (۱۶) استفاده گردید [۱۴، ۵].

$$v = (0.082 T_a + 22.4) \left(\frac{1}{29} + \frac{w}{18} \right) \quad (17)$$

که در آن، U ضریب کلی انتقال حرارت ($W/m^2 \cdot C$) و A سطح (m^2) است. برای تعیین ضریب کلی انتقال حرارت (U) یاد شده در معادله (۲۷) از معادله (۲۸) استفاده شد [۱۴]:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{k_i} + \frac{1}{h_o} \quad (28)$$

در معادله (۲۸)، h ضریب انتقال حرارت ($W/m^2 \cdot C$) و x ضخامت دیواره (m) است. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی خارجی (یعنی به صورت جابه‌جایی آزاد) یا h_o به ترتیب از معادله‌های (۲۹)، (۳۰) و (۳۱) یعنی اعداد بدون بُعد گراشوف (N_{Gr})، رایلی (N_{Ra}) و ناسلت (N_{Nu}) استفاده شد [۱۴]:

$$N_{Gr} = \frac{\rho^2 d_c^3 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (29)$$

در معادله (۲۹)، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، d_c مشخصه بُعد (m)، β ضریب انبساط حجمی هوا (s^{-1}) و μ گرانیروی ($Pa \cdot s$) است.

$$N_{Ra} = N_{Gr} \times N_{Pr} \quad (30)$$

در معادله (۳۰)، N_{Pr} عدد پرنتل (بدون بُعد) است.

$$N_{Nu} = a(N_{Ra})^m = \frac{h_o d_c}{k_{air}} \quad (31)$$

در معادله (۳۱) a و m ثابت‌هایی هستند که به شکل هندسی و موقعیت قرارگیری جسم (در اینجا یعنی بدنه خشک‌کن) بستگی دارند که در این پژوهش مقادیر آن‌ها برای یک صفحه عمودی به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۲۵ است (برای عدد رایلی مابین $10^4 - 10^9$). لازم به ذکر است که تمامی خواص فیزیکی سیال (هوا) در دمای فیلم ($T_f = (T_{sur} + T_w)/2$) و توسط جداول ارائه شده در کتب مهندسی تعیین شد. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت داخلی (یعنی به صورت جابه‌جایی اجباری) یا h_i به ترتیب از معادله‌های (۳۲) و (۳۳) یعنی اعداد بدون بُعد رینولدز (N_{Re}) و ناسلت استفاده شد [۱۴].

$$N_{Re} = \frac{\rho \bar{u} D_h}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D_h \mu} \quad (32)$$

کار تلف شده (افت انرژی) بیان می‌شود، بنابراین معادله‌های (۲۰) و (۲۱) برای تعیین این افت در محفظه خشک‌کن به کار گرفته شد (معادله ۲۳) [۵، ۱۵]:

$$\dot{E}x_{L,dc} = \dot{E}x_{dc,i} - \dot{E}x_{dc,o} \quad (23)$$

هم‌چنین، کارایی انرژی (η) محفظه خشک‌کن به صورت نسبت انرژی تولیدی (اختلاف بین انرژی ورودی و افت انرژی) به انرژی جریان درون‌ریز برای محفظه خشک‌کن تعریف شده و به صورت زیر (معادله ۲۴) محاسبه می‌شود [۱۵، ۱۷]:

$$\eta_{Ex,dc} = \frac{\dot{E}x_{dc,i} - \dot{E}x_{L,dc}}{\dot{E}x_{dc,i}} \quad (24)$$

به منظور شفاف‌سازی و تحلیل مفهوم انرژی محققین از پارامتری به نام "پتانسیل بهبود انرژی" یا IP استفاده نمودند که توسط معادله (۲۵) بیان گردید [۱۵، ۱۷]:

$$IP = (1 - \eta_{Ex,dc}) \dot{E}x_{L,dc} \quad (25)$$

در معادله (۲۵)، IP پتانسیل بهبود انرژی (kW یا kJ/s) و η کارایی انرژی (/) است.

۶.۲. تعیین تلفات حرارتی بدنه و اتصالات

به منظور تعیین تلفات حرارتی ناشی از اتصالات خشک‌کن از معادله (۲۶) استفاده شد [۱۴]:

$$\frac{q_p}{L} = \frac{T_i - T_o}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) / 2\pi k_i} \quad (26)$$

در معادله (۲۶)، q انرژی حرارتی (J)، L طول لوله (m)، r شعاع لوله (m) و k ضریب هدایت حرارتی ($W/m \cdot C$) است.

نظر به این که در قسمت داخلی و خارجی محفظه خشک‌کن انتقال حرارتی به دو شیوه جابه‌جایی آزاد (بدنه بیرونی) و اجباری (داخل محفظه خشک‌کن) صورت می‌گیرد، بنابراین از اصول حاکم بر آن جهت تعیین میزان اتلاف انرژی حرارتی بدنه خشک‌کن استفاده شد. میزان انرژی حرارتی خارج شده از بدنه خشک‌کن توسط معادله (۲۷) تعیین شد [۱۴]:

$$q_{dc} = UA(T_{w,i} - T_{sur}) \quad (27)$$

در معادله (۳۶)، I شدت انرژی تابشی خورشید (W/m^2) است

[۵].

$$HL_{dc}(\%) = \frac{q_{dc}}{Q_i} = \frac{q_{dc}}{I_{ave}A} \times 100 \quad (37)$$

۳. نتایج و بحث

شکل (۲) تغییرات شدت تابش خورشید را بر حسب تابعی از زمان محلی هنگامیکه برگ‌های تازه چیده شده نعنای فلفلی تحت فرایند خشک کردن (روش‌های I و II) قرار گرفتند نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در روش‌های خشک کردن I و II تابش خورشید از مقدار حداقل تقریباً صفر (صبح در زمان محلی حدوداً ۴:۰۰) تا مقدار حداکثر معادل W/m^2 (۱۰:۱۱/۸۶ برای روش I و $10.75/95 W/m^2$ برای روش II افزایش یافت (بعد از ظهر در زمان محلی حدوداً ۱۲:۰۰) و دوباره پس از آن به مقدار حداقل خود کاهش یافت (عصر در زمان محلی حدوداً ۱۹:۲۰). نوسانات تابش خورشیدی مشاهده شده در منحنی به دلیل شرایط آب و هوایی محلی ناپایدار بود (بری شدن هوا طی فرایند خشک کردن). نتایج مشابه در این خصوص توسط مختاریان و همکاران در خصوص خشک کردن پسته رقم کله قوچی با یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه بازگردش هوا مشاهده شد [۵].

در معادله (۳۲)، D_h قطر هیدرولیک (m) است.

$$N_{Nu} = \frac{h_i d_c}{k_{air}} \quad (33)$$

عدد بدون بعد ناسلت یاد شده در معادله (۳۳) از طریق معادله (۳۴) محاسبه شد [۱۴]:

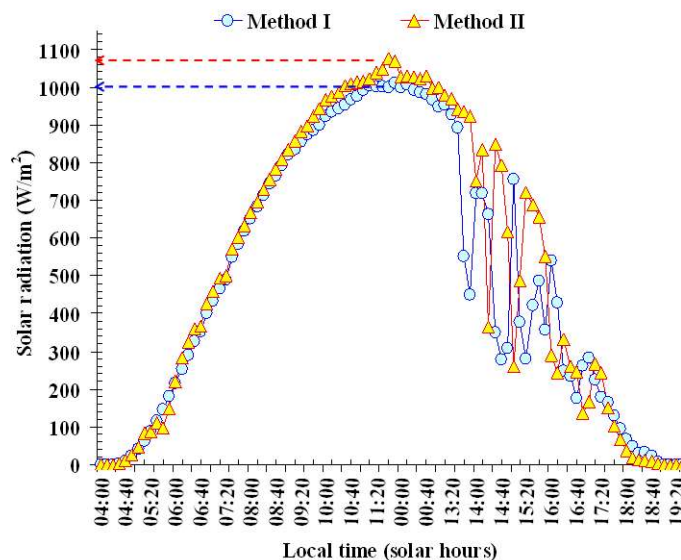
$$N_{Nu} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(N_{Re} - 1000)N_{Pr}}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}(N_{Pr}^{0.67} - 1)} \quad (34)$$

هم‌چنین فاکتور اصطکاکی (f) ارائه شده در معادله (۳۴)، توسط رابطه (۳۵) تعیین شد [۱۴]:

$$f = \frac{1}{(0.79 \ln N_{Re} - 1.64)^2} \quad (35)$$

لازم به ذکر است که در این حالت، تمامی خواص فیزیکی سیال (هوا) در دمای توده ($T_\infty = (T_{i,dc} + T_{o,dc})/2$) و توسط جداول ارائه شده در کتب مهندسی تعیین شد. در نهایت تلفات حرارتی (HL) ناشی از اتصالات و بدنه خشک‌کن به ترتیب از معادله‌های (۳۶) و (۳۷) تعیین شد [۵].

$$HL_p(\%) = \frac{q_p}{Q_i} = \frac{q_p}{I_{ave}A} \times 100 \quad (36)$$



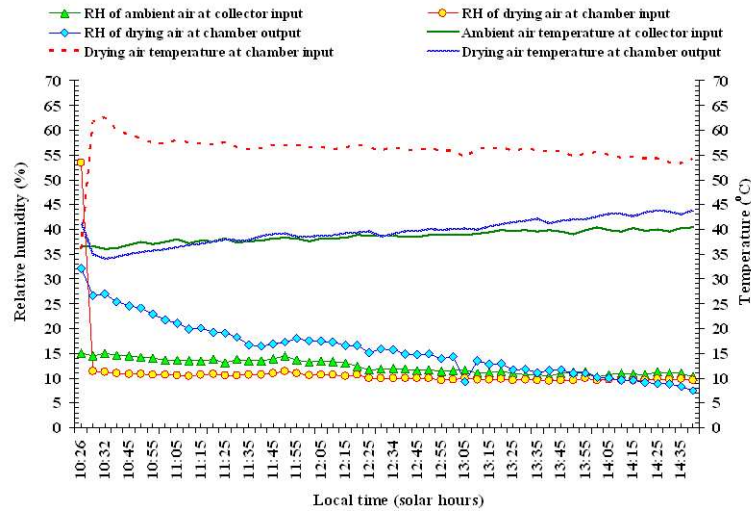
شکل (۲) تغییرات شدت انرژی تابش خورشید در مقابل زمان محلی برای خشک کردن نعنای فلفلی (روش I: خورشیدی و روش II: آفتابی)
 Fig. 2 Variation of the intensity of solar radiation vs. local time for peppermint drying (Method I: solar drying and Method II: sun drying)

خروجی کلکتور (ورودی خشک‌کن) افزایش دهد (یعنی از ۵۳/۸۲ تا ۸۸/۵۱ kJ/kg)، این در حالی بود که از این مقدار آنتالپی هوای ورودی به محفظه خشک‌کن فقط ۳۲/۷٪ از آن توسط محصول مصرف شده و مابقی از طریق دریچه خروجی خشک‌کن خارج شده است. نتایج به دست آمده در مورد انرژی انتقال یافته از هوا به محصول این مطلب را به خوبی تأیید می‌کند که فقط ۱۶/۴٪ از انرژی ورودی به محفظه خشک‌کن صرف افزایش گرمای محسوس و تبخیر آب از محصول شده است. انرژی جذب شده به دست آمده برای خشک‌کردن نعنای فلفلی (در دامنه ۲۹۴/۵ تا ۲۰۶/۳ W) با داده‌های به دست آمده توسط سایر محققین قابل مقایسه است. فودهولی و همکاران تحلیل انرژی یک خشک‌کن خورشیدی را برای فلفل چیلی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مقدار انرژی مفید جذب شده توسط کلکتور خورشیدی را در دامنه ۳۹۹ تا ۱۹۷۸ W به دست آوردند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد [۱۹]. آکبولنت و دورموس نیز خشک‌کردن لایه‌ای نازک توت را در یک خشک‌کن همرفت اجباری بررسی نمودند. آن‌ها حداکثر مقدار انرژی خروجی از کلکتور خورشیدی را در روز اول خشک‌کردن برای شدت جریان‌های گرمی هوای ۰/۱۴ kg/s و ۰/۳۶ kg/s به ترتیب ۳۹۲/۸۰ W و ۶۰۰ W محاسبه نمودند [۲۰]. همانطور پیش‌تر اشاره شد، نسبت مصرف انرژی به صورت نسبت انرژی مصرف شده در محفظه خشک‌کن به مقدار انرژی جذب شده توسط کلکتور خورشیدی تعریف می‌شود. طبق جدول (۴) و شکل (۴c) مقدار متوسط این شاخص در مورد خشک‌کردن نعنای فلفلی ۸۴٪ محاسبه شد. نسبت مصرف انرژی یک محفظه خشک‌کردن ارتباط مستقیمی با نرخ جریان گرمی هوا داشته و با کاهش جریان گرمی هوا، افزایش می‌یابد [۵]. آکپینار و همکاران خشک‌کردن برش‌های کدوی حلواپی را در یک خشک‌کن سینی‌دار استوانه‌ای بررسی و گزارش نمودند که مقدار نسبت مصرف انرژی با کاهش سرعت هوا، افزایش می‌یابد [۱۵].

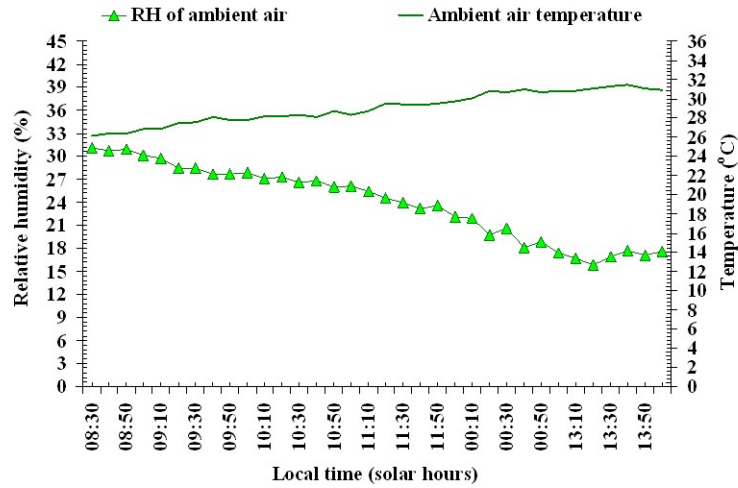
اگر انرژی یک سیستم خشک‌کردن به عنوان بیشینه انرژی مفید و امکان‌پذیر بوده که سیستم را با گرمای انباشته شده در کلکتور خورشیدی به حالت تعادل در می‌آورد. اُفت کار یا اختلاف بین بیشینه کارها با کار واقعی به عنوان اُفت انرژی نامیده می‌شود [۵]. شکل (۵) انرژی ورودی (درون‌دار)، خروجی (برون‌دار) و اُفت انرژی محاسبه شده را برای گرم مورد استفاده جهت

شکل (۳) و جدول (۳) تغییرات شرایط ترمودینامیکی هوای مورد استفاده جهت خشک‌کردن برگ‌های نعنای فلفلی چیده شده را در روش‌های مختلف خشک‌کردن (روش‌های I، II و III) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین دمای هوای محیط در روش‌های خشک‌کردن II و III به یکدیگر نزدیک بوده در حالی که آن‌ها نسبت به روش I کم‌تر هستند (جدول ۳). در روش خشک‌کردن I دمای هوای محیط توسط کلکتور خورشیدی افزایش یافته (بیش‌تر از ۳۱٪) و به میانگین مقدار ۵۶°C در خروجی کلکتور رسیده است (جدول ۳). با وجود آن‌که اختلاف دمای (ΔT) هوای محیط و نعنای فلفلی در روش II بعد از جذب نمودن گرمای خورشیدی روزانه خیلی کم است (۴°C)، در روش خشک‌کردن I بعد از عبور هوا از میان کلکتور خورشیدی چند گذر (با سطح ۱/۲۶ m²) به حدود ۱۸°C رسید. این رخداد در حالتی مشاهده گردید که میانگین شدت تابش خورشیدی در روش I (۸۶۰/۴ W/m²) نسبت به روش II (۹۵۶/۹ W/m²) در حدود ۱۰٪ کم‌تر است (جدول ۳). مختاریان و همکاران زمانی که از یک کلکتور مسطح متخلخل (با سطح کل ۴/۴ m²) برای خشک‌کردن پسته استفاده نمودند، مقدار افزایش دما هوای محیطی را در خروجی کلکتور معادل ۱۸°C به دست آوردند که با پژوهش حاضر مطابقت دارد [۵]. آکپینار از یک کلکتور خورشیدی با صفحه جذب تیغه‌دار و جابه‌جایی هوای اجباری را برای خشک‌کردن لایه‌ای نازک برگ‌های نعنای استفاده نمود و اذعان نمود که افزایش دمای هوای محیط در خروجی کلکتور ۲۰°C بود که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد [۱۲]. هم‌چنین یافته‌های قابل مقایسه‌ای در مورد مقادیر نسبت ΔT/A به دست آمده در این پژوهش با سایر پژوهش‌ها به دست آمد. در حالی که مقدار این نسبت با استفاده از کلکتور خورشیدی ما به ۱۴/۲۹°C/m² رسید، این مقدار به ترتیب برای خشک‌کردن خورشیدی برگ‌های نعنای [۱۲] و سبزیجات برگی [۱۸] معادل ۲۴/۶°C/m² و ۱۱/۵°C/m² بودند.

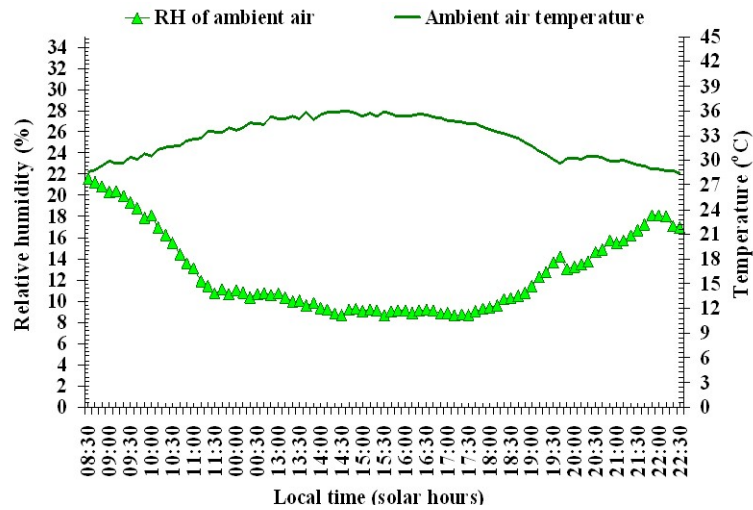
معادله‌های ۱۸-۲ برای محاسبه آنتالپی هوای عبوری از کلکتور خورشیدی، انرژی انتقال یافته از هوای خشک‌کردن به نعنای فلفلی در محفظه خشک‌کن و نسبت مصرف انرژی (EUR) به کار گرفته شدند. نتایج این محاسبات در جدول (۴) و شکل (۴) آورده شده است. با توجه به نتایج، کلکتور خورشیدی چندگذر توانست به طور متوسط مقدار آنتالپی هوای محیطی را تا ۴۰٪ در



(a)



(b)



(c)

شکل (۳) تغییرات دما و رطوبت نسبی در برابر زمان محلی: (a) روش I، (b) روش II و (c) روش III

Fig. 3 Variation of drying air temperature and relative humidity vs. local time: a) Method I, b) Method II and c) Method III

جدول (۳) مقایسه متوسط پارامترهای ترمودینامیکی طی خشک کردن نعناع فلفلی با روش‌های مختلف خشک کردن.

Table 3 Comparison of the average of thermodynamic parameters during peppermint drying with different dehydration methods.

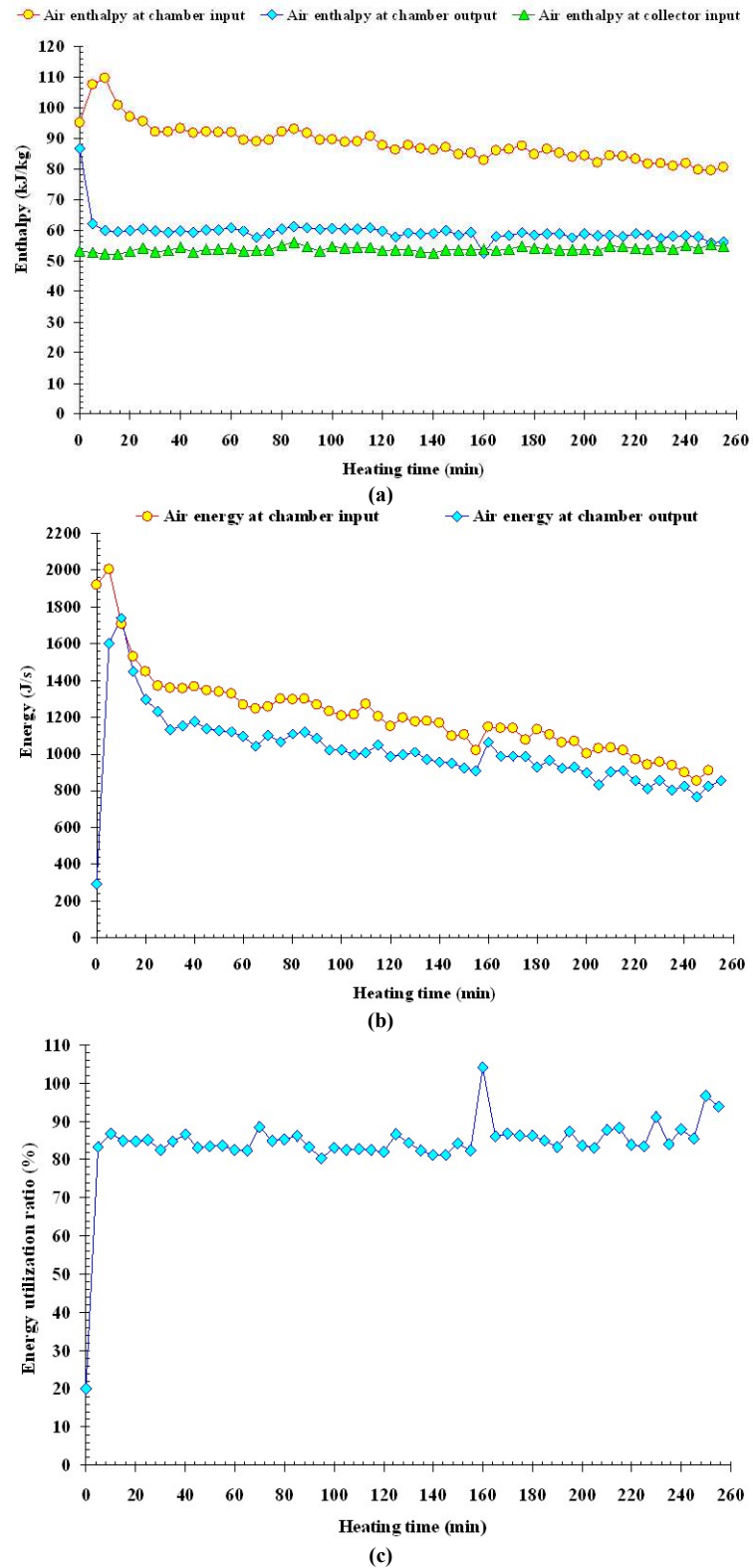
نسبت پارامتر (I/II) Parameter ratio (I/II)	روش‌های خشک کردن* Drying methods*			پارامترهای خشک کردن Drying parameters
	III	II	I	
~1.32	32.66	29.06	38.56	دمای هوای محیط طی خشک کردن (°C) Ambient air temperature during drying (°C)
-	-	-	~56	دمای هوا در خروجی کلکتور (°C) Air temperature at the output of collector (°C)
~1.33	-	33	44	دمای هوا برای خشک کردن نعناع فلفلی (°C) Air temperature for peppermint drying (°C)
-	-	-	~40	دمای هوا در خروجی محفظه خشک کن (°C) Air temperature at the exhaust of drying chamber (°C)
~0.899	-	956.9	860.4	شدت تابش خورشید I (W/m^2) Solar radiation (W/m^2)
4.5	-	~4	~18	افزایش دمای هوای محیط به واسطه آفتاب یا خشک کن خورشیدی ΔT (°C) Ambient Air temperature rise due to sun and solar drying ΔT (°C)
5	-	0.0042	0.021	نسبت $[\Delta T/I_{ave}]$ (m^2C/W) Ratio of $\Delta T/I_{ave}$ (m^2C/W)
-	-	-	14.29	نسبت $\Delta T/A$ (C/m^2) Ratio of $\Delta T/A$ (C/m^2)

* روش I: خشک کردن خورشیدی، روش II: خشک کردن آفتابی و روش III: خشک کردن در سایه.

(۰/۵۵۵ تا ۰/۵۵۵ J/s) شد [۱۷]. فودهولی و همکاران نیز حداقل و حداکثر انرژی ورودی و خروجی را برای خشک کردن فلفل چیلی به ترتیب (۱۲/۷ و ۵۰۵/۷ J/s) و (۱۱/۷ و ۴۸۹/۷ J/s) محاسبه نمودند. آن‌ها گزارش نمودند که تغییرات انرژی ورودی و خروجی به علت نوسانات شدت تابش روزانه خورشید است [۱۹].

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که مقادیر آفت انرژی با افزایش زمان گرمایش کاهش می‌یابد که این حالت به دلیل آفت دما طی دوره خشک کردن است (به دلیل کاهش شدت تابش خورشید در بعد از ظهر). هم‌چنین اوپرا و همکاران بیان نمودند که آفت انرژی خشک کن با افزایش دمای هوای خشک کردن افزایش می‌یابد. آن‌ها گزارش نمودند که افزایش دمای هوای خشک کردن از ۴۰ تا ۶۰°C سبب افزایش آفت انرژی از ۰/۳۴۴ تا ۲/۱۳۱ J/s می‌شود [۱۷]. نتایج فودهولی و همکاران نشان داد که تغییرات آفت انرژی به علت نوسانات شدت تابش روزانه خورشید است [۱۹]. شدت جریان گرمی هوا در سیستم خشک کن نیز آفت انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آکبولنت و دورموس نیز گزارش نمودند که مقدار آفت انرژی محفظه خشک کن با افزایش شدت جریان گرمی هوا، کاهش می‌یابد [۲۰].

خشک کردن نعناع فلفلی بر حسب تابعی از زمان گرمایش نشان می‌دهد. انرژی یک سیستم (ورودی و خروجی) ارتباط مستقیمی با دما و شدت جریان گرمی هوا داشته به طوری که با افزایش این مقادیر، افزایش می‌یابد [۵]. طبق شکل فوق، با افزایش زمان گرمایش به دلیل کاهش شدت تابش خورشید روی صفحه جذب (یعنی در بعد از ظهر)، مقدار انرژی جذب شده توسط هوای عبوری از میان کلکتور کاهش یافته که این رخداد با کاهش دما در خروجی کلکتور همراه بوده و سبب ایجاد روند کاهشی در انرژی ورودی به محفظه خشک کن می‌گردد. از طرف دیگر همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات انرژی خروجی بر حسب تابعی از زمان گرمایش افزایشی است. این حالت به دلیل آفت رطوبت موجود در محصول طی گذشت زمان خشک کردن است به عبارت دیگر با خشک تر شدن محصول، مقدار گرمای محسوس لازم برای رطوبت‌زدایی از محصول کاهش یافته که سبب خارج شدن آن از محفظه خشک کن می‌شود و این حالت با افزایش انرژی خروجی همراه است. اوپرا و همکاران تحلیل انرژی را برای خشک کردن نشاسته کاساوا بومی در یک خشک کن سینی دار مطالعه نمودند. آن‌ها گزارش نمودند که افزایش دمای هوای خشک کردن از ۴۰ تا ۶۰°C، سبب افزایش انرژی ورودی و خروجی به ترتیب از (۰/۳۹۹ تا ۲/۶۸۶ J/s) تا



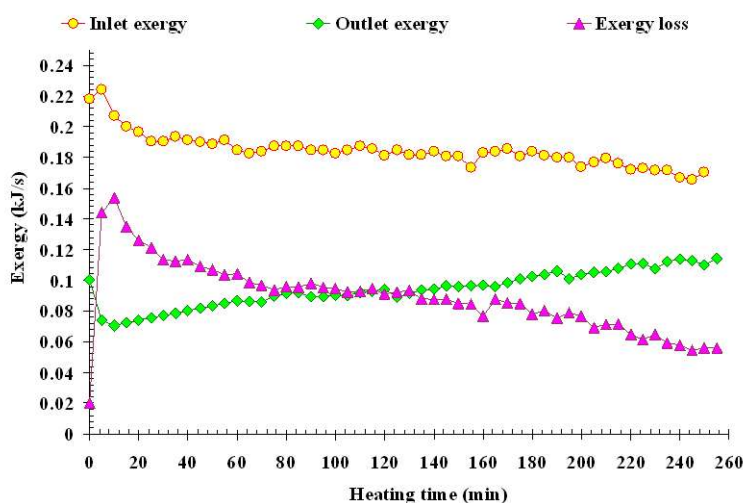
شکل (۴) تأثیر زمان حرارت‌دهی روی تغییرات آنتالپی هوا در محفظه خشک‌کن (a)، انرژی انتقال یافته از هوای گرم شده به محصول در محفظه خشک‌کن (b) و نسبت مصرف انرژی نعنای خشک شده (c)

Fig. 4 Effects of heating time on the variation of drying air enthalpy in dryer chamber (a), energy transferred from the air to the product in drying chamber (b) and energy utilization ratio of the dried peppermint (c)

جدول (۴) مقایسه متوسط شاخص‌های تحلیل انرژی (آنتالپی، انرژی و نسبت مصرف انرژی) طی خشک کردن نعنای فلفلی در خشک کن خورشیدی. **Table 4** Comparison of the average of energy analysis indexes (enthalpy, energy and energy utilization ratio) during peppermint drying in the solar drying method.

مقدار مصرف شده شاخص طی خشک کردن (%) The amount consumed of the index during drying (%)	اختلاف خالص* (Δ) Pure difference* (Δ)	خروجی Output	ورودی Input	بخش Part
-	+34.69	88.51	53.82	آنتالپی هوا در کلکتور خورشیدی (kJ/kg) Enthalpy in solar collector (kJ/kg)
32.7	-28.98	59.53	88.51	آنتالپی هوا در محفظه خشک کن (kJ/kg) Enthalpy in drying chamber (kJ/kg)
16.4	-199.7	1014.9	1214.6	انرژی انتقال یافته از هوا به محصول در محفظه خشک کن (W یا J/s) Energy transferred from the air to the product in drying chamber (J/s or W)
-	84.05	-	-	نسبت مصرف انرژی (EUR) Energy utilization ratio (EUR), %

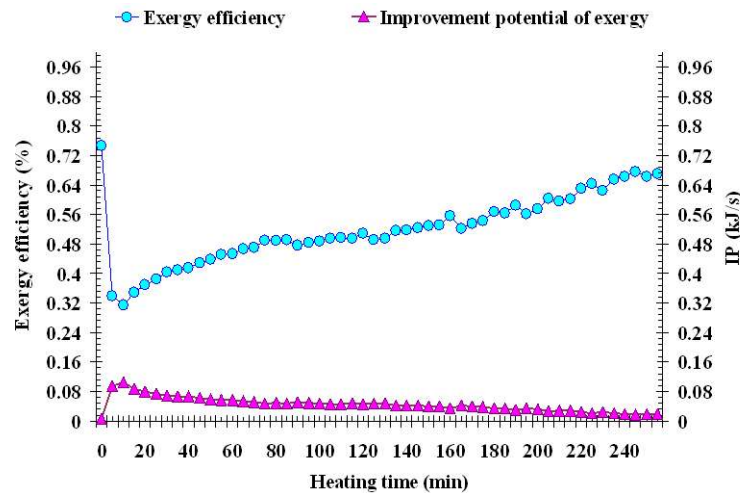
*علامت جبری درج شده بیانگر اختلاف خالص مثبت (افزایش) یا منفی (کاهش) است.



شکل (۵) تأثیر زمان گرمایش خورشیدی روی انرژی ورودی، انرژی خروجی و آفت انرژی نعنای فلفلی خشک شده
Fig. 5 Effects of heating time on inlet exergy, outlet exergy and exergy loss of the dried peppermint

چیلی بین ۹۷-۴۳٪ (متوسط ۵۷٪) تعیین نمودند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد [۱۹]. میدلی و کوکوک گزارش نمودند که کارایی انرژی با افزایش دمای هوای خشک کردن کاهش می‌یابد [۲۱]. آکبونت و دورموس بیان نمودند که با افزایش شدت جریان جرمی هوا، میزان کارایی انرژی افزایش می‌یابد [۲۰]. دستاوردهای حاصل از پژوهش اوپرا و همکاران نیز نشان داد که پتانسیل بهبود انرژی خشک کن با افزایش دمای

شکل (۶) مقادیر کارایی انرژی و قدرت بهبود گرمایش هوا (پتانسیل بهبود انرژی) محاسبه شده را برای خشک کردن نعنای فلفلی طی دوره خشک کردن در یک خشک کن مجهز به کلکتور چندگذر نشان می‌دهد. اگرچه مقدار کارایی انرژی با حداقل آفت انرژی معادل ۶۷٪ بود، اما زمانی که آفت انرژی تا مقدار ۱۵۳۶kJ/s ~۰/۳۲ زیاد شد، تا ۳۲٪ کاهش یافت. فودهولی و همکاران میزان کارایی انرژی را در خصوص خشک کردن فلفل



شکل (۶) تأثیر زمان گرمایش روی کارایی انرژی (η_{ex}) و پتانسیل بهبود انرژی هوای خشک‌کننده مورد استفاده در خشک‌کردن خورشیدی نعنای فلفلی
Fig. 6 Effects of heating time on exergy efficiency (η_{ex}) and exergetic improvement potential (IP) of drying air used in the solar drying of peppermint

نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که، کلکتور خورشیدی چندگذر طراحی شده در این مطالعه توانست دمای هوای عبوری از میان کلکتور خورشیدی را (با مساحت سطح $1/26 \text{ m}^2$) به حدود 18°C افزایش دهد ($\Delta T/A = 14/29^\circ\text{C}/\text{m}^2$) که این رخداد در میانگین شدت تابش خورشیدی $860/4 \text{ W}/\text{m}^2$ مشاهده شد. همچنین، تغییرات آنتالپی خشک‌کن مورد مطالعه نشان داد که کلکتور خورشیدی چندگذر توانست به طور متوسط مقدار آنتالپی هوای محیطی را تا 40% در خروجی کلکتور (ورودی محفظه خشک‌کن) افزایش دهد که فقط $32/7\%$ از مقدار مطلق آنتالپی ورودی به محفظه خشک‌کن توسط محصول مصرف گردید. به علاوه، نتایج تحلیل انرژی خشک‌کن خورشیدی نشان داد که طی دوره خشک‌کردن نعنای فلفلی به ترتیب انرژی ورودی و خروجی خشک‌کن $23/96\%$ کاهش و $38/35\%$ افزایش یافت. همچنین نتایج آفت انرژی نیز طی دوره خشک‌کردن نزولی بود ($63/46\%$ کاهش). محاسبات صورت گرفته نشان داد که برای خشک‌کردن نعنای فلفلی ($2/5 \text{ kg}$) از رطوبت حدوداً 78% تا رطوبت ایمن 7% ، حدوداً $505/66 \text{ J}/\text{s}$ انرژی مورد نیاز است. از طرف دیگر مقدار انرژی کسب شده توسط واحد سطح کلکتور $1084/1 \text{ J}/\text{s}$ است. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که، مقدار انرژی به دست آمده حدوداً قادر است تا ۲ برابر تغذیه فعلی دستگاه (یعنی تا $5/36 \text{ kg}$ خوراک) را تا رسیدن به رطوبت 7% خشک نماید (مقدار انرژی مصرف شده توسط برگ‌های نعنای

هوای خشک‌کردن به صورت خطی افزایش می‌یابد. آن‌ها گزارش نمودند که افزایش دمای هوای خشک‌کردن از 40°C تا 60°C سبب افزایش پتانسیل بهبود انرژی از $0/2$ تا $1/6 \text{ J}/\text{s}$ گردید [۱۷]. فودهولی و همکاران پتانسیل بهبود انرژی را بین صفر تا 135 (متوسط $47 \text{ J}/\text{s}$) گزارش نمودند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد [۱۹].

معادله‌های ۲۶-۳۷ برای محاسبه مقادیر تلفات حرارتی اتصالات و بدنه خشک‌کن مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این محاسبات در جدول (۵) ارائه شده است. مقدار انرژی جذب شده توسط کلکتور خورشیدی طی دوره خشک‌کردن نعنای فلفلی (با زمان خشک‌کردن $2/5 \text{ h}$) با مقدار شدت تابش خورشیدی معادل $860/4 \text{ W}/\text{m}^2$ در حدود $9/76 \text{ MJ}$ محاسبه شد. با محاسبه مقادیر اتلاف انرژی ناشی از اتصالات و بدنه خشک‌کن، مقدار درصد اتلاف کل طی دوره خشک‌کردن نعنای فلفلی $3/88\%$ تعیین شد (حدوداً $2/89\%$ از اتلاف محاسبه شده ناشی از اتصالات است). در مجموع نتایج نشان داد که میزان تلفات حرارتی خشک‌کن نسبتاً کم بوده که این بیانگر رعایت دقیق اصول طراحی است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تحلیل انرژی، انرژی و تلفات حرارتی خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری مورد بررسی قرار گرفت.

جدول (۵) تعیین تلفات حرارتی اتصالات و محفظه خشک‌کن خورشیدی طی فرایند خشک‌کردن از نعنای فلفلی.

Table 5 Determination of heat loss of connection pipe and solar dryer chamber during the drying process of peppermint.

اتلاف کل، % Overall loss	انرژی تلف شده طی دوره خشک‌کردن، MJ Energy loss during drying, MJ			انرژی جذب شده توسط کلکتور طی دوره خشک‌کردن، MJ Gained energy by collector during drying, MJ	متوسط شدت تابش خورشیدی، W/m ² Average sun intensity, W/m ²	زمان خشک‌کردن، h Drying time, h	روش خشک‌کردن Drying method
	جمع Sum	بدنه Body	اتصالات Connections				
3.878	0.378	0.0965	0.282	9.76	860.4	2.5	روش I Method I
-	-	-	-	-	956.9	5.5	روش II Method II
-	-	-	-	-	-	14	روش III Method III

* روش I: خشک‌کردن خورشیدی، روش II: خشک‌کردن آفتابی و روش III: خشک‌کردن در سایه.

شعاع، m	r	فلفلی (۲/۵ kg) (۴۶/۶۴٪ ~ بود).
ثابت جهانی گازها، ۸/۳۱۴ kJ/kmol K	R	به طور کلی با توجه به نتایج پژوهش حاضر مشخص شد که
شدت تابش خورشیدی، W/m ²	I	خشک‌کردن خورشیدی نعنای فلفلی با دستگاه خشک‌کن
دمای هوا، °C یا K	T	خورشیدی (خشک‌کن طراحی شده در این مطالعه) به مراتب
زمان، s	t	بهتر از حالت خشک‌کردن سنتی بوده و جهت مکانیزه کردن
سرعت هوا، m/s	u	صنعتی خشک‌کردن این محصول توصیه می‌گردد.
ضریب کلی انتقال حرارت، W/m ² °C	U	
سرعت میانگین، m/s	\bar{u}	فهرست علائم
شدت جریان حجمی هوا، m ³ /s	\dot{V}	علائم انگلیسی
کار مکانیکی، kJ/s	\dot{W}	A سطح، m ²
نسبت رطوبت، kgH ₂ O/kgD _a	w	c_p گرمای ویژه هوا، kJ/kg K
ضخامت دیواره، m	x	$(D_h)D$ قطر و مشخصه بُعد، m
ارتفاع از سطح دریا، در سبزواری ۹۷۷/۶ m	Z	\dot{E} انرژی، kJ/s
ارتفاع از سطح مبنا، m	z	\dot{E}_x انرژی، kJ/s یا kW
		g شتاب گرانش، ۹/۸ m/s ²
		h آنالپی (kJ/kg)، ضریب انتقال حرارت (W/m ² °C)
		IP پتانسیل بهبود انرژی، kJ/s یا kW
		k ضریب هدایت حرارتی، W/m°C
		\dot{m} شدت جریان جرمی هوای، kg/s
		N_{pr} عدد پرنتل، بدون بُعد
		P_{sur} فشار محیطی، در سبزواری ۹۰/۱۱۸ kPa
		P_{vs} فشار بخار اشباع هوا، kPa
		q یا \dot{Q} انرژی حرارتی، J، kJ/s
علائم یونانی		
ضریب انبساط حجمی و زاویه بین کلکتور	β	
خورشیدی و صفحه افق، s ⁻¹ ، درجه	δ و Δ	
اختلاف بین دو مقدار و زاویه میل (انحراف)، درجه	η	
کارایی، %	λ	
گرمای نهان تبخیر آب، kJ/kg	μ	
ویسکوزیته، Pa.s	v	
حجم مخصوص هوا، m ³ /kg	ρ	
چگالی، kg/m ³		

محفظه خشک کن	dc	مجموع بین چندین مقدار	Σ
اگرژی	ex	رطوبت نسبی، % و عرض جغرافیایی، درجه	Φ و ϕ
اولیه، ورودی، دورن ریز، داخلی	i		
أفت، طول لوله (m)	L		زیرنویس
خروجی، برون ریز، خارجی	o	هوا، انباشت	a
لوله	p	مطلق	abs
محیط	sur	کلکتور (جمع کننده)	col
سیستم	sys	خشک کن	d
محیط (مرجع)	∞	هوای خشک کننده	da

منابع

- conditions and drying behavior of selected products. *Solar Energy*, 105, 190-205.
- [10] El-Sebaei, A.A., Shalaby, S.M. (2013). Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Con. Manage.*, 74, 109-16.
- [11] Rodriguez, J., Clemente, G., Sanjuan, N., Bon, J. (2012). Modelling drying kinetics of thyme (*Thymus vulgaris* L.): Theoretical and empirical models, and neural networks. *Food Sci. Technol. Int.*, 20, 13-22.
- [12] Akpinar, E.K. (2010). Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. *Energy Con. Manage.*, 51, 2407-18.
- [13] AOAC. (1990). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 17th ed.; AOAC Press: Arlington, TX.
- [14] Singh, R.P. Heldman, D.R. (2009). *Introduction to Food Engineering*, 4th ed, Academic Press, Elsevier, California.
- [15] Akpinar, E.K., Midilli, A., Bicer, Y. (2006). The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Food Eng.*, 72, 320-331.
- [16] Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M.H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Con. Manage.*, 87, 711-725.
- [17] Aviara, N.A., Onuoha, L.N., Falola, O.E., Igbeka, J.C. (2014). Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. *Energy*, 73, 809-817.
- [18] Montero, I., Blanco, J., Miranda, T., Rojas, S., Celma, A. (2010). Design, construction and performance testing of a solar dryer for agro industrial by-products. *Energy Con. Manage.*, 51, 1510-1521.
- [19] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M.H., Ruslan, M.H., Gabbasa, M., Kazem, H.A. (2014). Performance analysis
- [1] Mokhtarian, M., Hamed, H., Jonaidi-Jafari, N.A., Akhondzadeh Basti, A. (2017). Investigation of different drying methods of peppermint (*Mentha piperita*) medical plant. *Med. Plant*, 16, 147-162. (In Persian)
- [2] FAO, 2012. "Food and Agriculture Organization of the United Nations", FaoStat Database, Available from <http://faostat.fao.org>.
- [3] Azizi, M., Rahmati, M., Ebadi, T., Hassan Zadeh Khayat, M. (2010). Investigation of the effect of different drying methods on weight loss rate, essence content and percentage of Kamazolen of chamomile medical plant (*Matricaria recutita* L.). *Iranian J. Med. Aromatic Plants*, 25, 182-192. (In Persian)
- [4] Afzal, T.M., Abe, T., Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Food Eng.*, 42, 177-182.
- [5] Mokhtarian, M., Tavakolipour, H., Kalbasi ashtari, A. (2016). Energy and exergy analysis in solar drying of pistachio with air recycling system. *Drying Technol.*, 34, 1484-1500.
- [6] Mokhtarian, M., Tavakolipour, H., Kalbasi-Ashtari, A. (2016) The effect of solar drying method in air recycle mode comparing with traditional method (exposing to direct sunlight) on the quality properties of pistachio nut. *Iranian J. Nut. Sci. Food Technol.*, 10, 93-102. (In Persian)
- [7] Sallam, Y.I., Aly, M.H., Nassar, A.F., Mohamed, E.A. (2015). Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. *Advance Res.*, 6, 171-78.
- [8] Cipliene, A., Novošinskas, H., Raila, A., Zvicevicius, E. (2015). Usage of hybrid solar collector system in drying technologies of medical plants. *Energy Con. Manage.*, 93, 399-405.
- [9] Şevik, S. (2014). Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic



of solar drying system for red chili. *Solar Energy*, 99, 47-54.

[20] Akbulut, A., Durmus, A. (2010). Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy*, 35, 1754-1763.

[21] Midilli, A., Kucuk, H. (2003). Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy*, 28, 539-556.

*Research Article***Exergy and Energy Analyses for Solar Drying of Peppermint (*Mentha piperita*)
With a Double-pass Collector****Mohsen Mokhtarian^{1*}, Ahmad Kalbasi-Ashtari²**

1. Young Researchers and Elite Club, Roudhen Branch, Islamic Azad University, Roudhen, Iran
2. Associate professor of Food Technology in University of Tehran, Karaj, Iran.

Abstract

Three methods of solar drying (I), sun drying (II) and shade drying (III) used to reduce the moisture content of peppermint from 87 to 7% (wet basis). The increase of air-drying temperature (ΔT) for peppermint dehydration in method II reached up to 4°C after absorbing of daily solar energy ($I_{ave}=957 \text{ W/m}^2$). However, in the method I, this parameter (ΔT) reached to 18°C after the ambient air passed through a double-pass heat collector (with only 1.26 m²area). Although the enthalpy of drying air in the method I reached to 35 kJ/kg (40% more than the other methods because of the high heat intensity of solar collector $I_{ave}=840 \text{ W/m}^2$), only ~16% of accumulated solar heat used to increase the peppermint temperature and evaporate its extra moisture. This is the reason that exergy in the inlet and outlet of the method I during drying peppermint reached to 24 and 38%, respectively. Furthermore, the drying capacity of peppermint in the method I was 100% more than the ones dried in methods II and III at the similar conditions. The total heat loss (because of connecting pipes and drying chamber) in the method I during peppermint drying was < 4% of the total heat collected in solar drier, which is negligible.

Keywords: Peppermint, Dryer, exergy, Energy, Air drying temperature.

* Corresponding author: mokhtarian.mo@riau.ac.ir