



## مروری بر تحلیل اکسرژی فرآیندها و سامانه‌های خشک کن خورشیدی

علی دادک<sup>۱\*</sup>، مرتضی آغباشلو<sup>۲</sup>، شاهین رفیعی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی،

دانشگاه تهران

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

ایمیل مکاتبه کننده: [adadak@ut.ac.ir](mailto:adadak@ut.ac.ir)

### چکیده

انرژی خورشیدی یک منبع انرژی تجدیدپذیر پاک، فراوان و آزادانه در دسترس می‌باشد. در سال‌های اخیر، توجه فزاینده-ای به تحلیل اکسرژی فرآیندها و سامانه‌های خشک کن خورشیدی و بهینه‌سازی فرآیندهای خشک کردن با استفاده از مفهوم اکسرژی پرداخته شده است. تحلیل اکسرژی ابزاری را برای بینش واقعی‌تری بین تلفات انرژی به محیط زیست و برگشت‌ناپذیری‌های داخلی در یک فرآیند مهیا می‌کند. هم‌چنین، تحلیل اکسرژی ابزاری برای دستیابی به استفاده‌ی کارآمد از انرژی خورشیدی است. با استفاده از تحلیل اکسرژی، بر اساس قوانین اول و دوم ترمودینامیک، پی بردن به پتانسیل واقعی انواع مختلف انرژی‌ها ممکن است. در این مقاله، رویکرد جامعی بر تحلیل اکسرژی خشک کن خورشیدی با بکارگیری مطالعات موردی انجام گرفته است.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، خشک کن خورشیدی، پایداری، اکسرژی، بازده اکسرژی.

### ۱- مقدمه

خشک کردن احتمالاً قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش نگهداری از مواد غذایی می‌باشد که توسط انسان‌ها بکار گرفته شده است (دویماز، ۲۰۰۷). اصطلاح خشک کردن یا آب‌زدایی به حذف رطوبت از مواد جامد و یا نزدیک به جامد از طریق تبخیر در شرایط کنترل شده اطلاق می‌شود (آغباشلو و صمیمی، ۲۰۰۸). با عمل خشک کردن آب زائد یا آبی که از نظر بیولوژیکی فعال است و موجب رشد میکروارگانیسم‌ها و فعالیت‌های آنزیم‌ها می‌شود، از ماده غذایی حذف و مدت نگهداری محصول بسیار طولانی می‌شود. خشک کردن علاوه بر مهیا نمودن شرایط حمل و نقل آسان‌تر محصول، پایداری میکروبی و عمر ماندگاری مورد نظر برای محصول را تضمین و اطمینان خاطر می‌بخشد (آغباشلو و همکاران، ۲۰۰۹). هدف اصلی از خشک کردن تولیدات کشاورزی کاهش محتوای رطوبتی به سطحی است که بتوان محصول را برای مدت



زیادی سالم و با کیفیت نگهداری کرد (دویماز، ۲۰۰۴). هرچند امروزه خشک کردن فقط به صنعت غذا محدود نمی‌شود. در دنیای صنعت، خشک کردن یک عملیات ضروری در شیمی، کشاورزی، بیوتکنولوژی، پلیمر، سرامیک، داروسازی، صنعت کاغذ، فرآوری مواد معدنی و صنایع چوب محسوب می‌شود (موجودمدار، ۲۰۰۶).

انرژی خورشیدی وسیع‌ترین و دسترس‌پذیرترین روش برای خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی به دلیل ارزان، ساده و راحت بودن آن می‌باشد. کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه هنوز هم از روش‌های خشک کردن سنتی تا حدود زیادی برای خشک کردن محصولات خود استفاده می‌کنند. می‌توان اظهار کرد که خشک کردن خورشیدی گزینه‌ی امیدوارکننده‌ای برای نگهداری تولیدات کشاورزی در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری به نظر می‌رسد، زیرا این مناطق ساعات و شدت تابش قابل ملاحظه‌ای را دریافت می‌کنند. بی‌شک خشک کردن مستقیم زیر آفتاب اگرچه به سرمایه و تخصص کمتری نیاز دارد، اما مشکلات زیادی در استفاده از این روش برای خشک کردن مواد غذایی وجود دارد. کیفیت پایین یا متغیر محصولات به علت عدم خشک شدن یکنواخت، وابسته بودن به شرایط آب و هوایی، نیاز به زمان طولانی برای خشک شدن، از دست دادن رایحه و ویتامین‌ها به دلیل تابش مستقیم نور خورشید، آلوده شدن به گرد و غبار، سرقت یا آسیب توسط پرندگان، موش‌ها یا حشرات و نیاز به فضای زیاد برای خشک کردن محصولات از معایب اصلی خشک کردن خورشیدی می‌باشند (آغباشلو و همکاران، ۲۰۱۰). لذا با تکیه بر این معایب می‌توان اظهار کرد که تکنولوژی‌های جدید برای فرآیند خشک کردن ضروری می‌باشند. با جستجو در منابع می‌توان دریافت که اولین بار در سال ۱۹۸۵، محقق‌ی بنام بیولو (Buelow) از خشک کن خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده کرد. این کار نقطه آغازی برای سایر پژوهشگران به منظور ارائه و ارزیابی انواع مختلف خشک کن‌های خورشیدی جهت خشک کردن محصولات کشاورزی قرار گرفت.

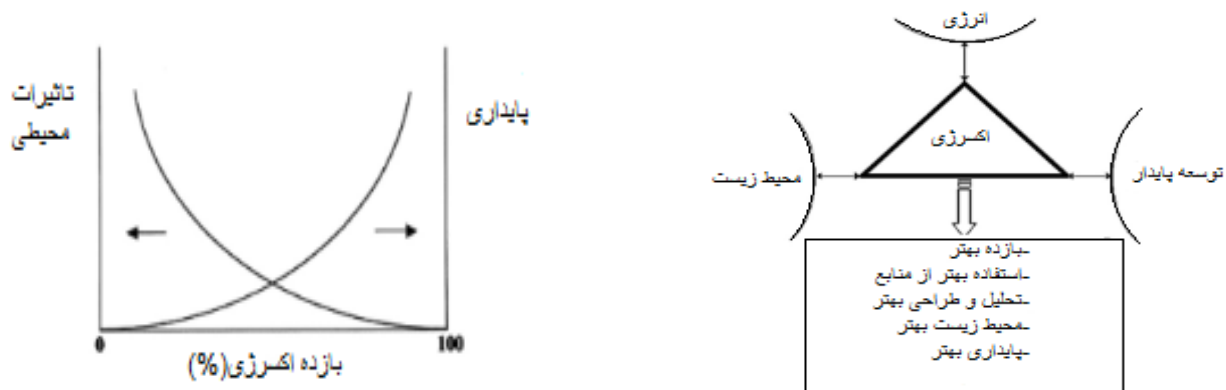
خشک کردن یک فرآیند پیچیده شامل انتقال گرما و جرم بین سطح محصول و محیط اطرافش به منظور کاهش سطح رطوبت محصول می‌باشد (دوتا و همکاران، ۱۹۸۸). به علت رسانش حرارتی پایین محصولات کشاورزی، انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی این مواد بسیار کند صورت می‌گیرد. لذا، خشک کردن آنها نیازمند مصرف انرژی فراوان است (افضل و همکاران، ۱۹۹۹). هم‌چنین با توجه به افزایش هزینه‌های سوخت‌های فسیلی و عدم اطمینان راجع به در دسترس بودن و هزینه‌های آینده این سوخت‌ها، کاربرد خشک کن‌های خورشیدی در خشک کردن محصولات کشاورزی احتمالاً افزایش خواهد یافت و در آینده‌ای نزدیک از نظر اقتصادی بیشتر عملی خواهد شد.

یکی از موضوعات کلیدی در فناوری خشک کردن، کاهش هزینه‌ی منابع تأمین انرژی و افزایش بازده تجهیزات خشک کردن به منظور کیفیت مطلوب محصولات خشک شده می‌باشد. از سوی دیگر، طراحی یک سامانه انرژی‌بر با هزینه‌ی کمتر و بازده بیشتر یکی از رویکردهای ضروری در رسیدن به توسعه‌ی پایدار می‌باشد. با توجه به قیمت بالای انرژی، نگرانی‌های زیست محیطی مانند باران‌های اسیدی و نازک شدن لایه‌ی اوزون، گرم شدن جهانی، افزایش جمعیت جهان و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، استفاده بهینه از انرژی و روش‌های مدیریت مصرف انرژی حیاتی هستند. تحلیل انرژی یک رویکرد ساده و سنتی برای برآورد فرآیندهای مختلف تبدیل انرژی می‌باشد (نازقلیچی و همکاران، ۲۰۱۱).



تحلیل انرژی بر اساس قانون اول ترمودینامیک می‌باشد، که اصل بقای انرژی را بیان می‌کند. تحلیل انرژی هیچ اطلاعاتی را درباره‌ی جنبه‌های برگشت‌ناپذیری فرآیندهای ترمودینامیکی ارائه نمی‌کند و این تحلیل بیان می‌کند که مقدارهای انرژی طبق قانون اول ثابت است و فقط از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌شود. هم‌چنین تحلیل انرژی در مورد کیفیت‌های مختلف انرژی مانند کیفیت گرما که به دمای منبع گرم بستگی دارد، هیچ اطلاعاتی را در اختیار قرار نمی‌دهد. با توجه به نقایص و کمبودهای تحلیل انرژی، تحلیل اکسرژی که نگرش واقع‌بینانه‌تری از فرآیندها و سامانه مهیا می‌کند، بعنوان ابزاری قدرتمند برای ارزیابی‌های مهندسان ظاهر شد.

اکسرژی حداکثر مقدار کاری است که از جریان یک ماده، گرما یا کار می‌توان به دست آورد، زمانیکه مقداری ماده با اجزای معمول محیط طبیعی از طریق یک فرآیند برگشت پذیر به تعادل ترمودینامیکی برسد و معیاری است از پتانسیل جریان به منظور ایجاد تغییر در محیط زمانی که به تعادل کامل با آن برسد (دینسر، ۲۰۱۱). شایان ذکر است که تحلیل اکسرژی نه تنها بزرگی، محل و علل برگشت‌ناپذیری‌ها را در یک نیروگاه مشخص می‌کند، بلکه به مهندسان این امکان را می‌دهد که بازده هر یک از اجزاء نیروگاه را نیز بطور جداگانه ارزیابی کنند (ردی و همکاران، ۲۰۱۲). ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن بر اساس مفهوم اکسرژی در سال‌های اخیر در میان محققان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی از تحلیل اکسرژی سامانه‌های خشک کردن ارائه تصویر واضحی از فرآیند، تعیین منابع برگشت‌ناپذیری‌ها، تشخیص کیفیت مصرف انرژی، انتخاب بهترین شرایط خشک کردن و کاهش اثرات زیست محیطی سامانه‌های خشک کردن می‌باشد. ارتباط بین انرژی، اکسرژی و تأثیرات زیست محیطی در مثلث ارائه شده توسط دینسر و روزن در شکل ۱ توضیح داده شده است (دینسر و روزن، ۲۰۰۵). در شکل ۲ ارتباط بین اکسرژی و پایداری و تأثیرات زیست محیطی نشان داده شده است (ردی و همکاران، ۲۰۱۲). با دقت در شکل می‌توان دریافت که افزایش بازده اکسرژی، اثرات زیست محیطی را کاهش و پایداری را افزایش می‌دهد و برعکس.



شکل ۱: مثلث میان رشته‌ای اکسرژی. شکل ۲: رابطه بین اثرات محیطی و پایداری یک فرآیند و بازده اکسرژی آن.

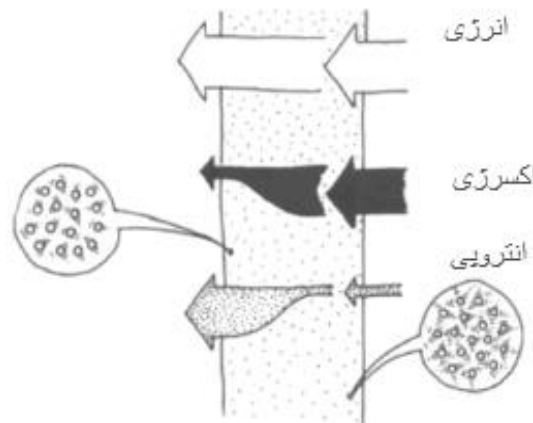
در این مطالعه، بخشی از جنبه‌های تحلیل اکسرژی و کاربردهای آن در فناوری خشک کردن خورشیدی به منظور تحلیل و بهینه‌سازی فرآیندهای خشک کردن خورشیدی مورد بحث قرار گرفته است.



## ۲- تحلیل اکسرژی

### ۱-۲- مفهوم اکسرژی

مفاهیم انرژی، آنتروپی و اکسرژی برگرفته شده از ترمودینامیک هستند و در تمام زمینه‌های علوم و مهندسی قابلیت کاربرد دارند. شکل ۳ طرحواره‌ای از جریان‌های انرژی، آنتروپی و اکسرژی ورودی و خروجی از یک سامانه را توضیح می‌دهد (شوکیا و هامچه، ۲۰۰۲). با توجه به شکل ۳ می‌توان دریافت که اندازه انرژی ورودی و خروجی از یک سامانه تحت شرایط گرمایی پایا با توجه به قانون اول ترمودینامیک برابر می‌باشد. اما، بزرگی آنتروپی خروجی از سامانه نسبت به آنتروپی ورودی به دلیل تلفات اکسرژی در داخل سامانه بیشتر است. از این استدلال می‌توان دریافت که تحلیل انرژی هیچ اطلاعاتی را درباره‌ی جنبه‌های برگشت‌ناپذیری فرآیندهای ترمودینامیکی به ما نمی‌دهد و بنابراین برای اهداف بهینه‌سازی و طراحی غیر قابل استفاده و بهبود می‌باشد. در حالیکه تحلیل اکسرژی سامانه قادر به تشخیص برگشت‌ناپذیری‌ها و ارائه راهکارهایی جهت بهینه‌سازی فرآیندها و سامانه‌های خشک کردن است.



شکل ۳: طرحواره‌ای از انرژی، اکسرژی و آنتروپی ورودی و خروجی از یک سامانه.

### ۲-۲- معادله تعادل جرم، انرژی، آنتروپی و اکسرژی برای فرآیند خشک کردن

معادله تعادل جرم برای یک سامانه خشک کن توسط معادله (۱) ارائه می‌شود:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

که در آن  $\dot{m}_{in}$  جرم ورودی و  $\dot{m}_{out}$  جرم خروجی از سامانه می‌باشد. معادله‌ی تعادل انرژی که بیان می‌کند انرژی ورودی با انرژی خروجی از یک سامانه برابر است، بصورت معادله (۲) می‌باشد:

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \quad (2)$$

که در آن  $\dot{E}_{in}$  انرژی ورودی و  $\dot{E}_{out}$  انرژی خروجی از سامانه می‌باشد. هم‌چنین فرم عمومی معادله‌ی اکسرژی ویژه که قابل استفاده برای سامانه‌های پایا می‌باشد، بصورت معادله (۳) است (آکپینار، ۲۰۰۵):



$$ex = (u - u_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty}) + \frac{P_c}{J}(v - v_{\infty}) + \frac{V^2}{2gJ} + (z - z_{\infty}) \frac{g}{g_c} + \sum_c (\mu_c - \mu_{\infty}) N_c + E_g A_g F_g (T_c^+ - T_{\infty}^+ - T_{\infty}^- T_c^-) + \dots \quad (3)$$

تعداد اکسرژی به شکل نرخ نیز با معادله (۴) قابل بیان است (ردی و همکاران، ۲۰۱۲):

$$\sum_k \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_k}\right) \dot{Q}_k + \sum Ex_{in} = W + \sum Ex_{out} + Ex_{dest} \quad (4)$$

معادله‌ی آنتروپی نیز بصورت معادله (۵) قابل بیان است:

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_{in} s_{in} - \sum \dot{m}_{out} s_{out} \pm \sum \frac{\dot{q}_r}{T_r} \quad (5)$$

که در آن علامت منفی در عبارت آخر مقدار گرمای منتقل شده به حجم کنترل و علامت مثبت نیز مقدار گرمای منتقل شده از حجم کنترل در منطقه ۲ واقع بر روی سطح کنترل را نشان می‌دهد. هم‌چنین مقدار آنتروپی تولید شده توسط معادله (۶) قابل محاسبه می‌باشد:

$$Ex_{dest} = T_{\infty} \dot{S}_{gen} \quad (6)$$

بازده اکسرژی محفظه‌ی خشک کن با استفاده از معادله (۷) قابل محاسبه است (اوزگنر و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\psi = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} \times 100 \quad (7)$$

که در آن  $\psi$  بازده اکسرژی،  $Ex_{in}$  اکسرژی ورودی و  $Ex_{out}$  اکسرژی خروجی از سامانه می‌باشد.

ون‌گول (۱۹۹۷) پیشنهاد کرد که بیشترین رشد در بازده اکسرژی یک فرآیند یا سامانه زمانی که تلفات اکسرژی یا برگشت ناپذیری‌ها حداقل باشد، قابل دست‌یابی می‌باشد. وی پیشنهاد کرد که بکارگیری مفهوم وابسته به اکسرژی، پتانسیل بهبود، در زمان تحلیل فرآیندها و بخش‌های مختلف یک سامانه مفید است. پتانسیل بهبود بصورت نرخ با معادله (۸) بیان می‌شود:

$$IP = (1 - \psi)(Ex_{in} - Ex_{out}) \quad (8)$$

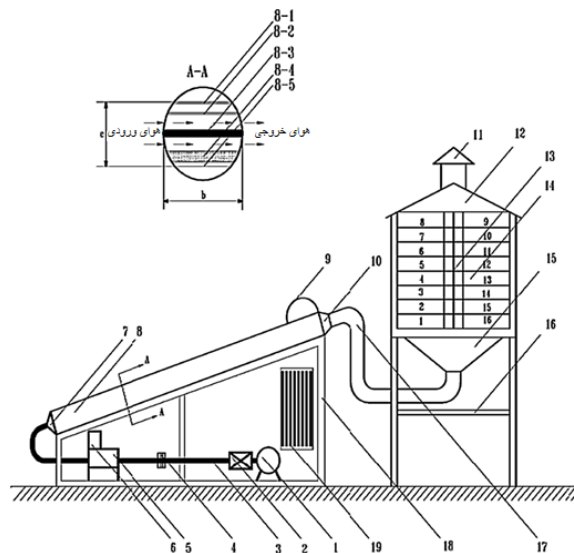
که در این رابطه  $IP$  پتانسیل بهبود می‌باشد. پتانسیل بهبود توسط محققان زیادی جهت یافتن پتانسیلی از فرآیند یا محفظه‌ی خشک کردن به منظور افزایش بازده اکسرژی استفاده شده است.

### ۳- کاربرد تحلیل اکسرژی در فرآیندها و سامانه‌های خشک کن خورشیدی

در این بخش به بررسی تعدادی از مطالعات انجام گرفته در زمینه تحلیل انرژی و اکسرژی سامانه‌های خشک کن خورشیدی می‌پردازیم.



میدیلی و کوچک (۲۰۰۳) تحلیل انرژی و اکسرژی فرآیند خشک کردن خورشیدی پسته‌های پوست‌دار و بدون پوست را در شرایط آب و هوایی ترکیه انجام دادند. خشک کن مورد استفاده از نوع خشک کن خورشیدی با همرفت اجباری بود که طرحواره‌ای از آن در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد. در طول آزمایشات، مشخص شد که پسته‌های پوست‌دار و بدون پوست به اندازه‌ی کافی در محدوده‌ی دمایی بین  $40^{\circ}\text{C}$  -  $60^{\circ}\text{C}$  در مدت ۶ ساعت خشک شدند. پسته‌های بدون پوست انرژی بیشتری را نسبت به پسته‌های پوست‌دار مصرف کردند. تلفات اکسرژی در نقطه‌ای که بازده اکسرژی ۱۰۰٪ بود، معادل با صفر بود، زیرا فرآیند خشک کردن در سامانه ادامه نیافت. ترکیب، ساختار و محتوای رطوبتی محصولات به منظور کاهش مصرف انرژی و تلفات اکسرژی باید مورد توجه قرار گیرند. قسمت بیشتری از اکسرژی تأمین شده توسط جمع‌کننده‌ی خورشیدی به وسیله‌ی هوای خروجی تلف می‌شود. بنابراین، ارائه طرح‌هایی جهت استفاده مجدد از اکسرژی تلف شده ممکن است بازده اکسرژی خشک کن‌های خورشیدی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. بازده اکسرژی با افزایش دمای محفظه کاهش، در حالیکه با پیشرفت زمان خشک کردن افزایش یافت.



شکل ۴: خشک کن خورشیدی کابینتی استفاده شده توسط میدیلی و کوچک.

تحلیل انرژی و اکسرژی فرآیند خشک کردن خورشیدی زردآلو در داخل محفظه‌ی خشک کن استوانه‌ای با ستون چرخان توسط آکینار و سارسیلماز (۲۰۰۴) انجام شد. بیشترین جریان و استفاده از اکسرژی با بیشترین تلفات اکسرژی در سامانه بطور هم‌زمان اتفاق می‌افتاد. بازده اکسرژی محفظه‌ی خشک کن بطور معنی‌داری از مطالعه‌ی میدیلی و کوچک (۲۰۰۳) کمتر بود. این امر می‌تواند ناشی از محتوای رطوبتی بالای زردآلوه‌ها در مقایسه با پسته‌ها باشد که تلفات اکسرژی در محفظه‌ی خشک کن را افزایش و به تبع بازده اکسرژی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این تفاوت در خصوصیات فیزیکی محصولات نیز می‌تواند منجر به این نابرابری شود.

آکینار (۲۰۱۰ و ۲۰۱۱) مشاهده نمود که بازده اکسرژی محفظه نسبتاً بالا بوده و قسمت اصلی اکسرژی عرضه شده به محفظه‌ی خشک کن توسط هوای خروجی به بیرون تلف می‌شود. پتانسیل بهبود با افزایش زمان خشک کردن و دمای هوای محیط کاهش یافت، در حالیکه بازده اکسرژی خشک کن با افزایش دمای هوای محیط افزایش یافت. بازده اکسرژی خشک کن روند متضادی با نسبت مصرف انرژی داشت. افزایش ظرفیت بارگیری محفظه، استفاده از سینی‌های متعدد، بازیافت





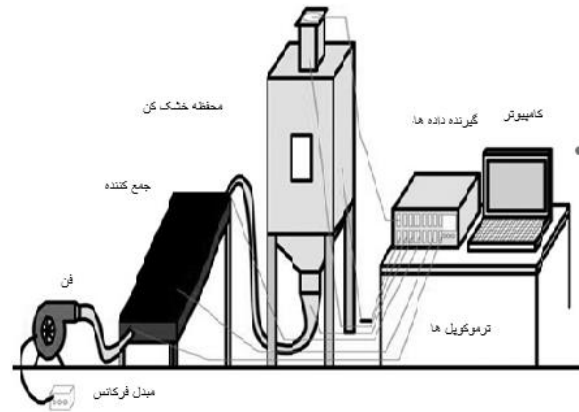
هوای خروجی و استفاده از پمپ گرما به عنوان راهکارهایی برای افزایش مصرف اکسرژی در خشک کن خورشیدی می‌تواند پیشنهاد شوند.

در مطالعه‌ی دیگری، تحلیل انرژی به منظور پیش‌بینی دمای سطح ماهی، دمای هوای محفظه‌ی گلخانه و رطوبت تبخیر شده در طول خشک کردن گلخانه‌ای میگو تحت شرایط همرفت آزاد و اجباری بکار گرفته شد (تیواری و همکاران، ۲۰۰۹). مقادیر پیش‌بینی شده انطباق خوبی را با داده‌های تجربی نشان داد. هم‌چنین، محقق یک رابطه‌ی تحلیلی برای بازده اکسرژی ارائه کرد. بازده‌های اکسرژی تحت همرفت اجباری و آزاد از بازده‌های انرژی متناظر کمتر بودند. هر چند بازده اکسرژی خشک کردن با همرفت اجباری از همرفت آزاد بهتر بود. این امر می‌تواند به نرخ خشک کردن سریع‌تر ناشی از سرعت بالای هوای خشک کردن نسبت داده شود. بازده اکسرژی خشک کن خورشیدی ممکن است در روزهای متوالی تغییر کند. می‌توان نتیجه گرفت که قسمت اندکی از اکسرژی عرضه شده بطور مفید برای خشک کردن در فرآیند خشک کردن خورشیدی استفاده شد.

سلما و کوادروسی (۲۰۰۹) آزمایشی را با استفاده از خشک کن خورشیدی با همرفت آزاد غیرمستقیم به منظور تحلیل انرژی و اکسرژی فرآیند خشک کردن لجن پساب زیتون انجام دادند. پارامترهای ضروری در خشک کردن بر طبق استانداردهای خشک کردن نظارت شدند. در حین آزمایش، مشخص شد که تلفات اکسرژی عمدتاً در طول روز دوم یعنی زمانیکه از انرژی موجود کمتر استفاده شده است، صورت گرفت. بازده اکسرژی محفظه‌ی خشک کن با افزایش دمای ورودی کاهش یافت که این امر باعث تلفات اکسرژی معنی‌داری شد. استفاده از پنل فتوولتائیک برای تهویه‌ی هوا به جای همرفت آزاد و افزایش سرعت خشک کردن با در نظر گرفتن بازده اکسرژی فرآیند خشک کردن و ملاحظات اقتصادی، مطالعات بیشتری را اقتضا می‌کند.

مدل ارائه شده توسط دنیسر و شاهین (۲۰۰۴) توسط اوزگنر به منظور محاسبه‌ی تغییرات اکسرژی خشک کن‌های خورشیدی گلخانه‌ای بکار گرفته شد (اوزگنر، ۲۰۰۹). بازده اکسرژی محفظه خشک کن ارتباط خطی کاهنده‌ای را با دمای ورودی و روند منحنی‌وار افزایش‌دهنده‌ای را با زمان خشک کردن نشان داد. هم‌چنین، افزایش دبی جرمی هوای خشک کن به علت تلفات اکسرژی زیاد در محفظه‌ی خشک کن بازده اکسرژی را کاهش داد. تلفات اکسرژی در داخل محفظه‌ی خشک کن نقش مهمی را در کاهش بازده اکسرژی محفظه توسط افزایش دما و سرعت هوای خشک کن داشت.

آکبولوت و دورموش (۲۰۱۰) آزمایشی را بر روی فرآیند خشک کردن لایه‌ی نازک توت توسط خشک کن خورشیدی با همرفت اجباری که طرحواره‌ای از آن در شکل ۵ نشان داده شده انجام دادند. همانطور که مورد انتظار بود، کاهش اختلاف بین دماهای ورودی و خروجی محفظه‌ی خشک کن بازده اکسرژی را بهتر کرد. نتایج نشان داد که تخریب اکسرژی با افزایش دبی جرمی هوای خشک کن کاهش، در حالیکه بازده اکسرژی افزایش پیدا کرده است.



شکل ۶: خشک کن خورشیدی غیرمستقیم نعناع.

شکل ۵: طرحواره‌ای از خشک کن خورشیدی.

در مطالعه‌ی دیگری، از خشک کن خورشیدی با همرفت اجباری مجهز به جمع‌کننده لوله‌ای خلاء استفاده شد. بازده اکسرژی جمع‌کننده از بازده انرژی خیلی کمتر بود و با افزایش دبی جرمی هوای خشک کن افزایش پیدا کرد (تیاقی و همکاران، ۲۰۱۰). بازده اکسرژی جمع‌کننده در طول آزمایش خشک کردن به دلیل تابش خورشید نوسان داشت. اما، بازده اکسرژی جمع‌کننده نسبت به بازده انرژی آن به دلیل حساسیت بیشتر تلفات انرژی به تابش خورشید، نوسان ملایم‌تری داشت. می‌توان نتیجه گرفت که بازده اکسرژی جمع‌کننده خیلی کم بود و پیشرفت بیشتری برای افزایش عملکرد اکسرژی جمع‌کننده‌های خورشیدی مورد نیاز است.

آزمایشی برای خشک کردن نعناع در فصل تابستان در خشک کن خورشیدی از نوع غیرمستقیم همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده انجام شد (بوکادوم و بنزوی، ۲۰۱۱). نتایج نشان داد که بازده اکسرژی در طی ۴/۵ ساعت اولیه آزمایش روند نزولی و سپس یک روند صعودی سهموی را تا پایان فرآیند خشک کردن از خود نمایش داد. بزرگی اکسرژی خروجی خیلی نزدیک به اندازه اکسرژی ورودی بود و این امر حاکی از آن است که مقدار اندکی از اکسرژی تولید شده بطور مؤثر در فرآیند خشک کردن مورد استفاده قرار گرفته است.

تحلیل انرژی و اکسرژی فرآیند خشک کردن خورشیدی لواشک جگفروت در یک تونل خشک‌کن خورشیدی نشان داد که قسمت اصلی انرژی دسترس‌پذیر در جمع‌کننده و خشک کن هدر رفت، که این حاکی از آن است که پتانسیل قابل توجهی برای بهینه‌سازی بازده اکسرژی خشک کن وجود داشت. بازده اکسرژی جمع‌کننده با تابش خورشید رابطه خطی داشت. نویسندگان از واحد خورشیدی بکار گرفته شده برای تهویه هوا در محاسبات اکسرژی صرف نظر کردند (چودری و همکاران، ۲۰۱۱).

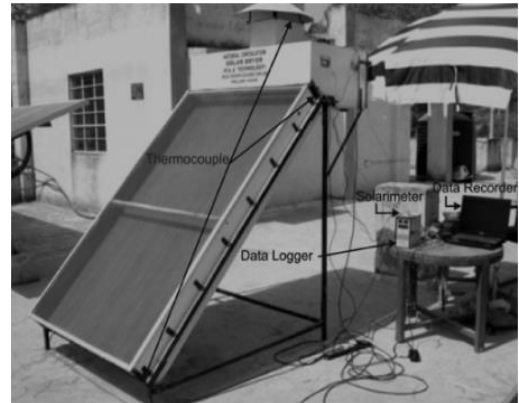
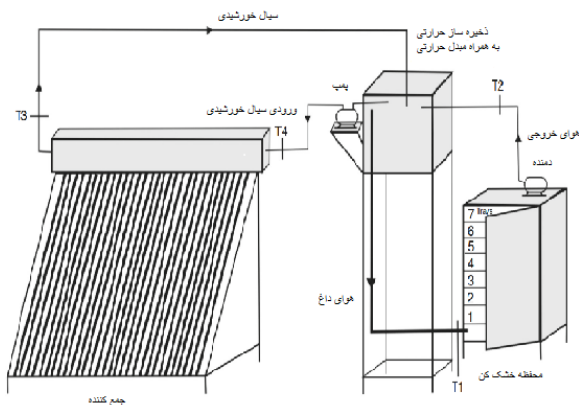
بولاجی (۲۰۱۱) تحلیل اکسرژی را برای سه نوع خشک کن خورشیدی مستقیم، غیرمستقیم و ترکیبی انجام داد. نویسنده معادله‌ی مناسبی را برای محاسبه‌ی اکسرژی تابش و همچنین تحلیل اکسرژی جمع‌کننده ارائه نکرده است. اما، نتیجه‌ی قابل قبولی که بازده اکسرژی محفظه‌ی خشک کن برای روش ترکیبی بیشتر از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم بوده، گزارش شده است.

پنوار (۲۰۱۴) ویژگی‌های خشک کردن لایه نازک برگ‌های گشنیز در یک خشک کن خورشیدی با همرفت طبیعی را مورد بررسی قرار داد. برگ‌های گشنیز از محتوای رطوبتی ۸۸٪ تا ۴/۵ درصد بر پایه تر در مدت ۷/۵ ساعت خشک شدند. داده





های بدست آمده از خشک کردن با هشت مدل مختلف سینتیک خشک کردن برازش داده شد. از این تعداد مدل پیشنهاد شده توسط میدیلی و همکاران (۲۰۰۲) بیشترین برازش را با رفتار خشک کردن برگ‌های گشنیز از خود نشان داد. بازده انرژی در طول مطالعه از ۷/۸۱٪ تا ۳۷/۹۳٪ تغییر کرد و بازده اکسرژی فرآیند خشک کردن در بازه ۵۵/۳۵٪ تا ۷۹/۳۹٪ تغییر کرد. شکل ۷ تصویری از دستگاه مورد استفاده در مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۸: طرحواره‌ای از سامانه خشک کن توسعه یافته.

شکل ۷: مجموعه مورد استفاده در خشک کردن گشنیز.

در مطالعه‌ی دیگری، تحلیل انرژی و اکسرژی فرآیند خشک کردن فلفل قرمز در خشک کن خورشیدی با همرفت اجباری غیرمستقیم انجام شد. در این آزمایش فلفل قرمز از محتوای رطوبتی ۸۰٪ تا محتوای رطوبتی ۱۰٪ بر پایه تر در مدت ۳۳ ساعت خشک شد. هم‌چنین سامانه‌ی خشک کن خورشیدی با روش خشک کردن خورشیدی سنتی در این مطالعه مقایسه شد. مشاهده شد که خشک کردن فلفل قرمز توسط سامانه خشک کن خورشیدی ۴۹٪ زمان خشک کردن را کاهش داد. بازده‌های جمع‌کننده خورشید، سامانه خشک کن، پیکاپ و اکسرژی برای تابش متوسط  $420 \text{ W/m}^2$  و دبی جرمی  $\text{kg/s}$  ۰/۰۷ به ترتیب ۲۸٪، ۱۳٪، ۴۵٪ و ۵۷٪ بود. حداکثر و حداقل بازده جمع‌کننده برای دمای خشک کردن ۲۸ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد و با مقدار متوسط  $44^\circ\text{C}$  به ترتیب ۵۵٪ و ۱۱٪ مشاهده شد. می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل اکسرژی به منظور ارزیابی عملکرد سامانه‌های خشک کن خورشیدی با بالاترین راندمان ترمودینامیکی باید مورد استفاده قرار گیرد (فودلی و همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعه‌ی جدیدی به منظور تحلیل عملکرد سامانه خشک کن خورشیدی مجهز به جمع‌کننده لوله خلاء و مواد تغییر فازدهنده، به عنوان ذخیره ساز انرژی حرارتی، برای خشک کردن لایه‌ی نازک حبه‌های سیر انجام گرفت. در این مطالعه داده‌های بدست آمده از خشک کردن با پنج مدل مختلف سینتیک خشک کردن برازش داده شدند. از این تعداد، مدل پیشنهاد شده توسط میدیلی و همکاران (۲۰۰۲) بهترین برازش را با رفتار خشک کردن حبه‌های سیر داشت. بازده اکسرژی فرآیند خشک کردن بدون احتساب و با در نظر گرفتن گردش هوای خشک کردن به ترتیب از ۵/۰۱٪ تا ۵۵/۳۰٪ و از ۶۷/۰۶٪ تا ۸۸/۲۴٪ تغییر کرد. می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به ویژگی‌های مطلوب و تراکم انرژی بالا در مواد تغییر فاز دهنده، این ذخیره‌سازها می‌توانند گزینه‌ی جذاب و مناسبی برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به منظور افزایش ساعات خشک کردن بعد از ساعات آفتابی و مهیا نمودن شرایط خشک شدن یکنواخت در خشک کن‌های خورشیدی باشند (شرینگی، ۲۰۱۴). طرحواره‌ای از سامانه فوق‌الذکر در شکل ۸ نشان داده شده است.



#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان تحلیل اکسرژی را برای سامانه‌های خشک کن تجدیدپذیر، مانند سامانه‌های خشک کن خورشیدی ارائه نموده‌اند. تحلیل اکسرژی در کاربردهای مختلفی برای تحلیل و بهینه‌سازی سامانه‌های انرژی استفاده شده است و می‌تواند برای غلبه بر مشکلات در زمینه‌های مختلفی شامل بهینه‌سازی بازده انرژی، استفاده از منابع انرژی و پیدا کردن علل، مکان و بزرگی برگشت‌ناپذیری‌ها کمک کند. با بررسی منابع می‌توان دریافت که هیچ اطلاعاتی در مورد کاربرد اکسرژی برای سامانه‌های خشک کن تجدیدپذیر صنعتی وجود ندارد. در مطالعات آینده، ارزیابی عملکرد اکسرژی انواع مختلفی از سامانه‌های خشک کن خورشیدی مانند سامانه خشک کن خورشیدی با ذخیره‌سازی حرارتی، ترکیبی با زمین گرمایی، سامانه خشک کن خورشیدی با فتوولتائیک، سامانه خشک کن خورشیدی با پمپ گرما و سامانه رطوبت زدایی خورشیدی، باید مورد بررسی قرار گیرد. لازم به ذکر است که با توجه به هزینه‌های فعلی سوخت‌های فسیلی، عدم اطمینان راجع به دسترس‌پذیری و هزینه‌های آینده این سوخت‌ها و اثرات زیست محیطی سامانه‌های خشک کن با سوخت فسیلی و انرژی برق، توجه رو به رشدی را برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر در فرآیندهای خشک کردن ایجاد کرده است.

جدول ۱- فهرست نمادها (Nomenclature)

$T$	دما، K	$A$	سطح مقطع، $m^2$
$u$	انرژی داخلی مخصوص، $kJ/kg$	$E$	قدرت انتشار، $kJ/s$
$v$	حجم مخصوص، $m^3/kg$	$ex$	اکسرژی مخصوص، $kJ/kg$
$V$	سرعت، $m/s$	$F$	ضریب شکل
$W$	نرخ کار، J/	$g$	ثابت گرانش، $m/s^2$
$z$	ارتفاع، $m$	$g_c$	ثابت قانون نیوتن
$\mu$	پتانسیل شیمیایی، $kJ/kg$	$I$	جریان الکتریکی، A
$N$	تعداد گونه‌ها	$J$	ثابت ژول
$\infty$	حالت مرده	$P$	فشار، $kPa$
$c$	شیمیایی	$q$	گرمای مخصوص، $J/kg$
		$s$	انترپی مخصوص، $kJ/kg K$



## منابع و مآخذ

1. Doymaz, I. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, vol 78(4), 1291-1297.
2. Aghbashlo, M., & Samimi-Akhijahani, H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, vol 49(10), 2865-2871.
3. Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Arabhosseini, A. (2009). Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Journal of Food Engineering*, vol 91(1), 99-108.
4. Doymaz, I. (2004). Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, vol 61(3), 341-346.
5. Mujumdar AS. 2006. *Hand book of industrial drying*. Third Ed. Marcel Dekker, New York.
6. Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & HASSAN-BEYGI, S. R. (2010). Drying and rehydration characteristics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.). *Journal of food processing and preservation*, vol 34(3), 351-365.
7. Dutta K, Nema VK, Bhardwaj RK. 1988. Drying behavior of spherical grains. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 31,855-61.
8. Afzal, T. M., T. Abe, & Y. Hikida. 1999. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering* vol 42: 177-182.
9. Nazghelichi, T., Aghbashlo, M., & Kianmehr, M. H. (2011). Optimization of an artificial neural network topology using coupled response surface methodology and genetic algorithm for fluidized bed drying. *Computers and electronics in agriculture*, vol 75(1), 84-91.
10. Dincer, I. (2011). Exergy as a potential tool for sustainable drying systems. *Sustainable Cities and Society*, vol 1(2), 91-96.
11. Reddy, V. S., Kaushik, S. C., & Tyagi, S. K. (2012). Exergetic analysis of solar concentrator aided natural gas fired combined cycle power plant. *Renewable Energy*, vol 39(1), 114-125.
12. Dincer, I., & Rosen, M. A. (2005). Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 9(2), 169-189.
13. Shukuya, M., & Hammache, A. (2002). Introduction to the concept of exergy-for a better understanding of low-temperature-heating and high-temperature-cooling systems. VTT TIEDOTTEITA.
14. Akpinar, E. K. (2005). Energy and exergy analyses of drying of eggplant slices in a cyclone type dryer. *Journal of mechanical science and technology*, vol 19(2), 692-703.
15. Reddy, V. S., Kaushik, S. C., & Tyagi, S. K. (2012). Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic trough concentrating solar thermal power plant (PTCSTPP). *Energy*, vol 39(1), 258-273.
16. Ozgener, L., Hepbasli, A., & Dincer, I. (2007). A key review on performance improvement aspects of geothermal district heating systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 11(8), 1675-1697.
17. Van Gool W. 1997. Energy policy: fairy tales and factualities'. In: Soares ODD, Martins da Cruz A, Costa Pereira G, Soares IMRT, Reis AJPS, editors. *Innovation and technology-strategies and policies*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers; vol 93-105.
18. Midilli, A., & Kucuk, H. (2003). Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy*, vol 28(6), 539-556.



19. Akpınar, E. K., & Sarsilmaz, C. (2004). Energy and exergy analyses of drying of apricots in a rotary solar dryer. *International Journal of Exergy*, vol 1(4), 457-474.
20. Akpınar, E. K. (2011). Drying of parsley leaves in a solar dryer and under open sun: modeling, energy and exergy aspects. *Journal of Food Process Engineering*, vol 34(1), 27-48.
21. Akpınar, E. K. (2010). Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. *Energy conversion and management*, vol 51(12), 2407-2418.
22. Tiwari, G. N., Das, T., Chen, C. R., & Barnwal, P. (2009). Energy and exergy analyses of greenhouse fish drying. *International Journal of Exergy*, vol 6(5), 620-636.
23. Celma, A. R., & Cuadros, F. (2009). Energy and exergy analyses of OMW solar drying process. *Renewable Energy*, vol 34(3), 660-666.
24. Dincer, I., & Sahin, A. Z. (2004). A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 47(4), 645-652.
25. Ozgener, L., & Ozgener, O. (2009). Exergy analysis of drying process: An experimental study in solar greenhouse. *Drying Technology*, vol 27(4), 580-586.
26. Akbulut, A., & Durmuş, A. (2010). Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy*, vol 35(4), 1754-1763.
27. Tyagi, S. K., Tyagi, V. V., Anand, S., Chandra, V., & Diwedi, R. C. (2010). First and second law analyses of a typical solar air dryer system: a case study. *International Journal of Sustainable Energy*, vol 29(1), 8-18.
28. Boulemtafes-Boukadoum, A., & Benzaoui, A. (2011). Energy and exergy analysis of solar drying process of Mint. *Energy Procedia*, vol 6, 583-591.
29. Chowdhury, M. M. I., Bala, B. K., & Haque, M. A. (2011). Energy and exergy analysis of the solar drying of jackfruit leather. *Biosystems engineering*, vol 110(2), 222-229.
30. Bolaji, B. O. (2011). Exergetic analysis of solar energy drying systems. *Natural Resources*, vol 2(02), 92.
31. Panwar, N. L. (2014). Experimental investigation on energy and exergy analysis of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves drying in natural convection solar dryer. *Applied Solar Energy*, vol 50(3), 133-137.
32. Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying technology*, vol 20(7), 1503-1513.
33. Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Gabbasa, M., & Kazem, H. A. (2014). Performance analysis of solar drying system for red chili. *Solar Energy*, vol 99, 47-54.
34. Shringi, V., Kothari, S., & Panwar, N. L. (2014). Experimental investigation of drying of garlic clove in solar dryer using phase change material as energy storage. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol 118(1), 533-539.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## A review on exergy analysis of solar drying processes and systems

### Abstract

Solar energy is a clean, abundant and freely available renewable energy sources. In recent years, growing attention has been given to exergy analysis of drying processes and systems and optimization of drying processes using exergy concept. Exergetic analysis provides a tool for a more realistic view between energy losses to the environment and internal irreversibilities in the process. As well as, Exergy Analysis is a tool to access the efficient usage of solar energy. Using exergy analysis, based on the first and second laws of thermodynamics, it is possible to infer the true potential of different kinds of energies. In this paper, a Holistic approach on exergy analysis of solar dryer with case studies has been made.

**Keywords:** drying, solar dryer, sustainability, exergy, exergy efficiency.