مروری بر کاربردهای مواد جاذب رطوبت در خشک‌کن‌های خورشیدی

مهدیه دوروزی[1*]، حمید مرتضی‌پور[2]، حمیدرضا اخوان[3]، احمد غضنفری مقدم[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- عضو هئیت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

* ایمیل نویسنده مسئول: mhdh_2roozi@yahoo.com

چکیده

فرآیند خشک کردن هر محصول زراعی یا باغی به دلیل مصرف انرژی قابل توجه، یکی از عملیات‌های پرهزینه پس از برداشت در کشاورزی می باشد. سوخت‌های فسیلی غیر قابل تجدید بوده و رو به اتمام می‌باشند به همین دلیل استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشیدی در خشک‌کردن محصولات کشاورزی، جایگزین مناسبی برای انرژی‌های فسیلی است. خشک‌کن‌های خورشیدی گردش هوای بسته (سیکل بسته) دارای بازده انرژی بیشتری در مقایسه با انواع باز هستند و به طور معمول در این خشک‌کن‌ها از مواد جاذب رطوبت برای کاهش رطوبت نسبی هوای عبوری از روی محصول، استفاده می‌شود. مواد جاذب رطوبت، هوای گرم و خشک مورد نیاز فرآیند خشک شدن را فراهم می‌کنند. این نوع خشک‌کن‌های خورشیدی دارای مزایای زیادی بوده و مقاله حاضر به کاربردهای مواد جاذب رطوبت در آن‌ها می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: انرژی، جاذب رطوبت، خشک‌کن خورشیدی

مقدمه

خشک کردن یک فرآیند انتقال جرم و حرارت برای حذف آب یا حلال دیگری از طریق تبخیر از یک جامد، نیمه جامد یا مایع است. به طور معمول جریان هوای داغ برای خشک کردن یک محصول به کار می‌رود و ازمنحنی خشک شدن برای تعیین نرخ خشک کردن استفاده می شود. فرآیند خشک کردن حدود ۱۲ درصد از کل انرژی مورد استفاده در بخش‌های صنعتی سراسر جهان را مصرف می‌کند. افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی باعث افزایش ارزش انرژی در فرایندهای خشک شدن و کاهش سود ناخالص عایدی کارخانه‌ها می‌گردد (Misha *et al*., 2012). اولین تأسیسات برای خشک کردن با انرژی خورشیدی در جنوب فرانسه مربوط به ۸۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح می‌باشد. خشک کردن خورشیدی هنوز به طور گسترده تجاری‌سازی نشده است. خشک‌کن‌های خورشیدی به طور معمول در ظرفیت‌های کوچک وجود دارند و ساخت آن‌ها بر اساس داده‌های تجربی و نیمه تجربی بوده تا طراحی‌های تئوری.

اغلب خشک‌کن‌های خورشیدی موجود جهت خشک کردن محصولات صنعتی در اندازه کوچک استفاده می‌شوند (Belessiotis and Delyannis, 2011). به طور معمول فرآیند خشک شدن به دو فاز تقسیم می‌شود. در فاز نخست، درون و سطح محصول در شروع فرایند، محتوای رطوبتی یکسانی دارند. سطح محصول به وسیله هوای داغ گرم شده و با بخار اشباع خواهد شد. در فاز دوم، هنگامی که سطح محصول خشک شد، آب از داخل محصول خارج شده و سپس بخار می‌شود. در این فاز، انرژی لازم بسیار مهم‌تر از فاز نخست می‌باشد (Fournier and Guinebault, 1995).

خشک کردن محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها بعد از برداشت محصول است. عمل خشک کردن، رطوبت دانه‌ها و دیگر محصولات را تا سطح مشخصی کاهش داده و عملیاتی حرارتی- فیزیکی و شیمی- فیزیکی است. عمل خشک کردن قابلیت نگهداری و انبار کردن موتد غذایی و سایر مواد را افزایش داده و آن‌ها را در مقابل حمله حشرات و میکروارگانسم‌ها حین نگهداری محافظت می‌کند. بنابراین در کشاورزی مدرن اهمیت دادن به خشک کردن به موقع یک مسئله مهم است (نصیری، ۱۳۸۸).

تعدادی از پژوهشگران به منظور افزایش بازده انرژی در خشک‌کن‌های خورشیدی، از سامانه گردش هوای بسته در این خشک‌کن‌ها استفاده کردند. در خشک‌کن‌های مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته، هوای گرم پس از عبور از روی محصول و جذب رطوبت آن، به محیط بیرون منتقل نمی‌شود. بلکه، از داخل جمع کننده‌ی خورشیدی عبور کرده و پس از گرم شدن، دوباره به صورت یک سیکل بسته برای خشک کردن، وارد محفظه محصول می‌شود. با توجه به این که رطوبت نسبی هوای عبوری در این نوع خشک کن، پس از مدتی به علت جذب رطوبت محصول، بالا می‌رود و قدرت جذب رطوبت آن کاهش می‌یابد. لذا، از مواد جاذب رطوبت در این نوع از خشک‌کن‌ها استفاده می‌شود. در این حالت هوای عبوری پس از خروج از محفظه‌ی محصول، از داخل مواد جاذب رطوبت عبور می‌کند تا رطوبت نسبی آن کاهش یابد. از دیگر مزایای استفاده از خشک کن مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته، کاهش آلودگی میکروبی در محصول به دلیل کاهش استفاده از هوای آزاد محیط است (Chen *et al*., 2005).

مواد جاذب رطوبت بر اصل انتقال رطوبت در اثر اختلاف فشار بخار بین ماده جاذب و هوا استوار است. ماده جاذب خنک با محتوای رطوبتی کم، رطوبت را از هوا جذب می‌کند تا فشار بخار ماده جاذب با هوا به تعادل برسد. برای احیای دوباره، ماده جاذب باید گرم شود تا زمانی که فشار بخار روی سطح آن بیشتر از هوای اطراف شود و ماده جاذب قادر به حذف رطوبت گردد. کاربرد ماده جاذب نمایش‌گر یک انرژی تجدیدپذیر است، اما فرآیند احیا را می‌توان با یک انرژی تجدیدپذیر یا تجدید ناپذیر اجرا کرد. برخی مطالعات با ماده جاذب اختصاصی ویژه با دمای احیای پایین صورت گرفته است. در دمای احیای پایین، انرژی خورشیدی و گرمای زایدی که از سامانه تولید می‌شود را می‌توان برای احیا به کار برد (Neti and Wolfe, 2000).

مواد جاذب رطوبت، هوای گرم و خشک مورد نیاز فرآیند خشک شدن را فراهم می‌کنند. مزایای مواد جاذب رطوبت در خشک کردن علاوه بر پایین بودن مصرف انرژی شامل خشک کردن پیوسته حتی در ساعات غیر آفتابی، افزایش نرخ خشک شدن به دلیل هوای گرم و خشک، خشک کردن بسیار یکنواخت و افزایش کیفیت محصول خصوصاً برای محصولاتی که به حرارت حساسند، می‌باشد.

برخی از مسائل در سامانه‌های جاذب رطوبت عبارتند از افت فشار در جاذب جامد، عمل انتقال مایع جاذب رطوبت به وسیله بخار هوا و ظرفیت جذب رطوبت پایین که به وسیله بهینه سازی طراحی سامانه جاذب بهبود پیدا می‌کند (Misha *et al*., 2012).

محققین زیادی مواد جاذب رطوبت ارزان قیمت و با دمای احیای پایین را بررسی و کاربردهای آن‌ها را بهینه‌سازی کردند. در سامانه‌های خشک کردن، استفاده از حرارت برای احیای ماده جاذب یک محدودیت در ذخیره انرژی است. بهرحال استفاده از انرژی کم یا انرژی موجود رایگان مثل انرژی خورشیدی یا گرمای تلف شده فرآیندهای صنعتی برای احیای ماده جاذب، سامانه را از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌سازد (Misha *et al*., 2012).

مزایای خشک‌کن‌های جاذب رطوبت عبارتند از: ۱) ماده جاذب اشباع شده را می‌توان به وسیله جریان هوای داغ احیا کرد؛ ۲) طراحی سامانه آسان است و به عملیات نگهداری برای سال‌های زیاد نیاز ندارد؛ ۳) به کارگیری ماده جاذب به همراه سایر روش‌های خشک کردن باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود و ۴) جایگزینی مواد جاذب بعد از سیکل‌های کاری آسان است (Chua and Chou, 2003).

هدف از این تحقیق بررسی مواد جاذب رطوبت مورد استفاده در خشک‌کن‌های خورشیدی، روش‌های احیا، مزایا و معایب آن‌ها می‌باشد؛ تا محقق در صورت تمایل به استفاده از مواد جاذب رطوبت، با مقایسه این مواد بتواند نوع خاصی را برگزیند.

مواد و روش‌ها

در ابتدا این سامانه‌ها بر اساس کاهش دمای هوا بواسطه دفع انرژی گرمای نهان هوا (معادل تبخیر آب در هوا) طراحی و در سامانه‌های تهویه مطبوع استفاده می‌شدند. ولی به تدریج کاربردهای دیگری از جمله در کشاورزی پیدا کردند. سامانه‌های جذب رطوبت که در خنک کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، بر اساس نوع ماده جاذب رطوبت به دو نوع جامد و مایع تقسیم می‌شوند. در سامانه جاذب جامد[1]، هوا از میان مواد جامدی که داخل چرخ مشبکی قرار می‌گیرد عبور کرده و ماده جاذب به دلیل اختلاف فشار بخار خود با هوا، رطوبت هوا را جذب کرده و باعث کاهش رطوبت هوا می‌شود. پس رطوبت جذب شده توسط ماده جاذب، در اثر حرارت ایجاد شده توسط سامانه گرمایشی (برقی یا فسیلی) بخار شده و از ماده جاذب دفع می‌شود و ماده جاذب دوباره احیا می‌شود. انتخاب نوع ماده جاذب به عواملی نظیر دمای احیا، ظرفیت جذب و دمای کارکرد آن‌ها بستگی دارد. از جاذب‌های مهم جامد می‌توان به زئولیت[2]، الک‌های ملکولی[3] و سیلیکاژل[4] اشاره کرد. در سامانه جاذب مایع، از محلول موادی مثل بروماید لیتیم، کلرید کلسیم و کلرید لیتیم با آب استفاده می‌شود و هوا ضمن عبور از روی مایع جاذب، رطوبت خود را به مایع داده و مایع جاذب طی فرایندی مشابه جاذب جامد،

[1]- Solid Desiccant
[2]- Zeolite
[3]- Molecular Sieves
[4]- Silica Gel

احیا می‌شود. سامانه جاذب جامد و مایع مزایا و معایبی دارند. به عنوان مثال دمای احیای پایین و عدم خورندگی فلزهای آن از مزایا و پیچیدگی در طراحی و تجهیزات آن از معایب جاذب جامد و خورندگی و مضر بودن و دمای احیای بالا از معایب و قابلیت انعطاف‌پذیری سامانه از مزایای سامانه جاذب مایع می‌باشد (Jones *et al*., 2005).

عموماً در سامانه‌های خنک کننده ساختمان‌ها از دو روش رایج، چرخ جاذب[1] و خنک کننده جذبی یا جذب کننده تبریدی[2] برای فرایند جذب رطوبت استفاده می‌شود. در روش چرخ جاذب، هوا در برخورد با سطح جاذب، رطوبت خود را به ماده جاذب می‌دهد. ماده جاذب مورد استفاده در چرخ جاذب، شامل مواد جامد جاذب رطوبت مثل سیلیکاژل است (Saman, 2007).

در روش خنک کننده جذبی یا جذب کننده تبریدی، هوا سرد شده و رطوبت خود را به جذب کننده می‌دهد. در این سامانه ابتدا هوا توسط دستگاه مبرد سرد می‌شود تا به نقطه شبنم برسد. در این نقطه آب موجود در هوا تبدیل به مایع شده و از هوا خارج می‌شود. سپس هوا دوباره گرم می‌شود تا به دمای مورد نظر برسد. با توجه به اینکه در این روش هوا باید سرد شود، انرژی زیادی مصرف می‌شود ولی در روش چرخ جاذب، چنین مشکلی وجود ندارد.

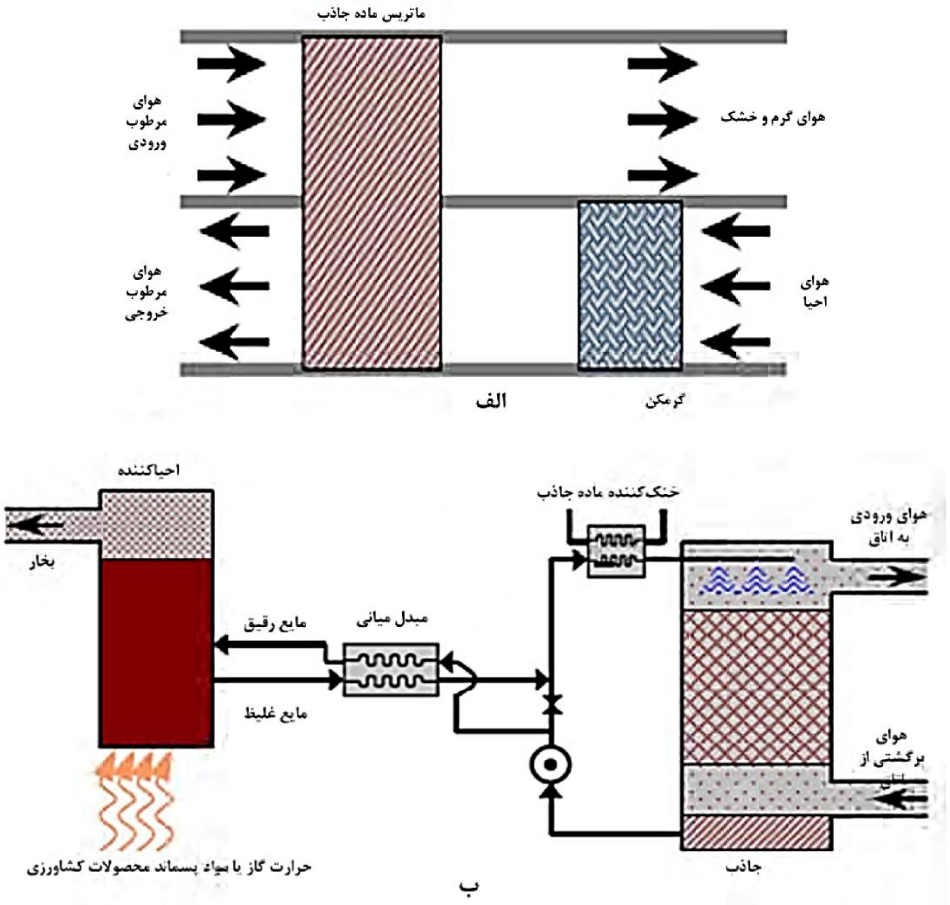
در پژوهش‌های متعدد از مواد جاذب رطوبت جهت ذخیره انرژی در خشک‌کن‌های خورشیدی استفاده شد. هر دو ماده جاذب مایع و جامد ذخیره انرژی بالایی برای کاربردهای خشک کردن دارند (Bal *et al*., 2010).

مواد جاذب رطوبت به شکل جامد یا مایع می‌باشند. برای مایع جاذب، فرآیند جذب رطوبت توسط یک ماده آبکی مثل کلرید کلسیم یا کلرید لیتیوم صورت می‌گیرد. مواد جاذب جامد شامل مواد متخلخلی مانند سیلیکاژل، سیلیکات آلومینیوم و زئولیت می‌باشد. انتخاب مواد جاذب بستگی به قیمت، شرایط کاری و منبع انرژی حرارتی دارد (Johannsen, 1981).

دابوس و جویس (۲۰۰۵) موادی مثل کلرید کلسیم را به عنوان جاذب جامد یا گلیسیرین و گلیکول را به عنوان جاذب مایع پیشنهاد کردند (Dubois, 1989) (Dubios and Joyce, 2005).

شکل (۱) فرایند جذب رطوبت هوا برای هر دو نوع سامانه جاذب مایع و جامد را که توسط چمرا و همکاران (به نقل از Anonymous, 2005) ساخته شده را نشان می‌دهد. در این سامانه هوای مرطوب در برخورد با ماده جاذب رطوبت خود را از دست می‌دهد و ماده جاذب نیز توسط هوای گرم خروجی از گرم‌کن احیا می‌شود .

[1]- Desiccant Wheel
[2]- Absorption Refrigerator



شکل (۱): فرایند جذب رطوبت هوا در سامانه جاذب رطوبت، الف) ماده جاذب جامد و ب) ماده جاذب مایع (Anonymous, 2005)

یکی از روش‌های احیای ماده جاذب استفاده از چرخ جاذب دوار می‌باشد. در یک چرخ جاذب دوار جریان هوای مرطوب ورودی یا هوای فرآیندی با دفع رطوبت آن توسط ذرات جاذب جامد یا مواد جاذب رطوبت، خشک می‌شود که این کار در واقع برای رطوبت‌زدایی از محیط صورت می‌گیرد و باعث افزایش درصد رطوبت در روی سطح جاذب شده و سپس رطوبت انباشته در ماده جاذب توسط جریان هوای بازیابی جذب می‌شود که عموماً این جریان به فضای بیرون ارسال می‌گردد (زمزمیان، ۱۳۸۷).

ساک و همکاران (Suk *et al*., 1980) انرژی لازم برای گرمایش هوای مرطوب، به دو صورت محسوس[1] و نهان[2] می‌باشد. برای گرم کردن ملکول‌های هوا به انرژی محسوس و برای گرمایش بخار آب موجود در هوا به انرژی نهان نیاز است. بنابراین اگر بتوان رطوبت هوا را کاهش داد، می‌توان در مصرف انرژی نهان صرفه‌جویی کرد. ماده جاذب مورد استفاده آن‌ها کلرید لیتیم و سیلیکاژل

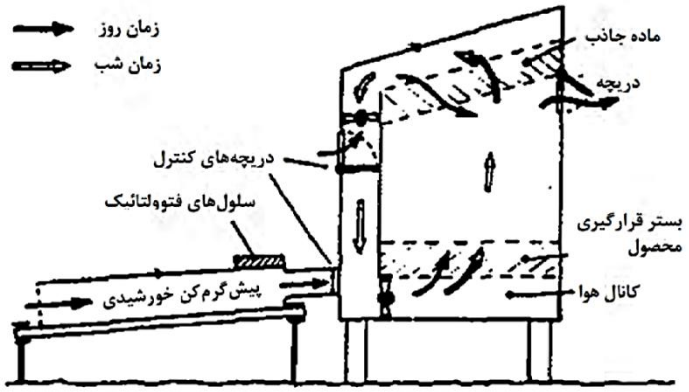
[1]- Sensible
[2]- Latent

بود. از مزایای سامانه‌های جذبی با ماده جاذب آب، عملکرد بالای سامانه در دمای پایین می‌باشد. از مزایای دیگر آن می‌توان به صرفه‌جویی در انرژی مصرفی اشاره کرد (Parsons *et al*., 1987) (Henning, 2007).

کارایی منبع خورشید برای گرمایش در موقعی که هوا آفتابی است، مناسب می‌باشد. ولی در شب و موقعی که هوا ابری است، نمی‌توان از این انرژی بهره گرفت. پس لازم است به نحوی این انرژی در روز ذخیره شود. این عمل با استفاده از خشک‌کن‌های جذبی امکان‌پذیر است ولی این روش بسیار پیچیده و گران قیمت است (Handbook-Fundamentals, 2005)

مواد جذبی پلیمری[1] ناپایدار هستند و نمی‌توان از آن‌ها در خشک‌کن‌های خورشیدی استفاده نمود (Czanderna, 1990). سیلیکاژل در دمای به نسبت پایین کار می‌کند ولی قیمت بالایی دارد و از نظر جذب رطوبت معروف است و می‌تواند به عنوان ذخیره کننده انرژی مورد استفاده قرار گیرد (Miller, 1985).

در سال ۱۹۹۶ خشک کن خورشیدی مجهز به دو نوع ماده جاذب رس بنتونیت و کلرید کلسیم برای خشک کردن ذرت طراحی و ساخته شد (Thoruwa T. F. N. *et al*., 1996).



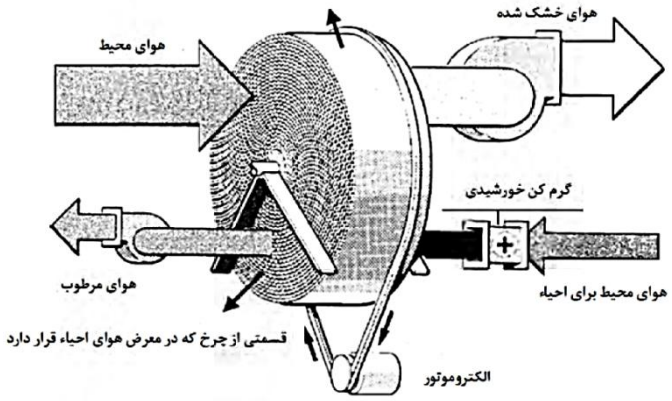
شکل (۲): خشک‌کن خورشیدی با ماده جاذب جامد (Thoruwa *et al*., 1996)

در تحقیقی یخ‌سازی ساخته شد که در آن از سامانه جاذب رطوبت استفاده می‌شد و انرژی خود را از انرژی خورشیدی یا پسماند محصولات کشاورزی تامین و روزانه $4\ kg.m^{-2}$ یخ تولید می‌کرد. ضریب کارایی آن بین ۰/۱ تا ۰/۱۶ بود و می‌توانست دمای ^0C ۲۰- را با دمای احیای ^0C ۱۱۵ ایجاد کند (Wang and Oliveira, 2006). در تحقیقی دیگر در همین رابطه روزانه ۴ تا ۵ کیلوگرم یخ بوسیله یخ‌ساز خورشیدی با ماده جاذب کربن و متانول تولید شد (Sumathy, 2002).

[1]- Polymeric Solid Desiccants

برای تداوم خشک کردن در شب و ساعات غیر آفتابی، جهت ذخیره انرژی خورشیدی از یک جرم حرارتی[1] یا ترکیب مواد جاذب رطوبت در سامانه خشک‌کن استفاده شد. مواد جاذب مورد استفاده بنتونیت، کائولینیت، کلرید کلسیم، ورمی کولیت و سیمان با درصدهای مختلف بود (Thoruwa TFN *et al*., 2000).

دای و همکاران (۲۰۰۲) از سامانه خنک کننده خورشیدی مجهز به سامانه جاذب رطوبت در انبارمانی غلات استفاده نمودند. سطح احیای چرخ جاذب ۰/۲۵ سطح کل بود (شکل ۳). مساحت کلکتور $20\ m^2$ و دمای احیا حدود $100\ ^0C$ بود (Dai *et al*., 2002). در تحقیقی از سامانه جامد جاذب رطوبت با ماده جاذب سیلیکاژل در خشک کردن گاز طبیعی استفاده شد و در نهایت بیان شد که استفاده از سیلیکاژل در فرایند خشک کردن بسیار اقتصادی‌تر از روش‌های قبلی در خشک کردن گاز است (Dai *et al*., 2002).



شکل (۳): چرخ جاذب و اجزای آن (Dai *et al*., 2002)

در تحقیقی برای خشک کردن نخود از یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه جاذب رطوبت استفاده شد. وظیفه ماده جاذب، ادامه فرایند خشک کردن نخود در شب و در مواقع عدم وجود نور خورشید، بود (Shanmugama and Natarajan, 2006).

رهنما و همکاران (۱۳۸۹) برای خشک کردن خرمای استعمران در استان خوزستان از یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سیلیکاژل استفاده کردند. این سامانه دارای دو جمع کننده (کلکتور) که وظیفه جمع کننده اولیه بالا بردن دمای محیط برای احیای ماده جاذب رطوبت چرخ جاذب و وظیفه دومی بالا بردن دمای هوای خشک خارج شده از چرخ جاذب به مقدار مورد نظر می‌باشد. این خشک کن از نظر نحوه کار، از دو فرایند مجزا تشکیل شده است: فرایند احیا، که در آن هوای گرم خارج شده از جمع کننده اول، سیلیکاژل موجود در چرخ جاذب را احیا می کند و هوا بعد از احیای چرخ جاذب به محیط باز می گردد. فرایند خشک کننده هوا: در آن هوای محیط وارد چرخ جاذب شده و بعد از کاهش رطوبت وارد جمع کننده دومی می شود. هوا بعد از عبور از جمع کننده ثانویه و رسیدن به دمای مورد نظر وارد محفظه خشک کن برای خشک کردن محصول شده و پس از فرایند خشک کردن به محیط باز می گردد (رهنما، ۱۳۸۹).

[1]- Thermal Mass

نتایج و بحث

با توجه به اینکه دمای احیای برخی جاذب‌ها (مثل سیلیکاژل) پایین است می‌توان از انرژی خورشیدی برای احیای آن‌ها استفاده نمود و در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد. تلاش‌های بسیاری در این راستا در سال‌های اخیر صورت گرفته است. مثلاً در تحقیقی گزارش شده که با استفاده از انرژی خورشیدی در سامانه تهویه مطبوع می‌توان در حدود ۲۵ تا ۴۰٪ در مصرف انرژی الکتریکی صرفه‌جویی نمود (Afonso, 2006).

ساباتلی و همکاران (۲۰۰۷) یک دستگاه جذب کننده رطوبت هوا با ماده جاذب جامد طراحی کردند. دمای کارکرد دستگاه ۴۵ تا ^{0}C ۹۰ (برای دمای احیا کننده) بود. این دستگاه با موادی مانند سیلیکاژل یا رئولیت به عنوان جاذب کار می‌کرد (Sabatelli *et al.*, 2005).

در تحقیقی دیگر سامانه خنک کننده جذبی مایع‌ای ساخته شد که ماده جاذب رطوبت آن کلرید لیتیم بود. در این سامانه رطوبت هوا توسط ماده جاذب جذب می‌شد. سپس ماده جاذب در معرض هوای گرم قرار گرفته و احیا می‌شد و ماده جاذب دوباره برای جذب رطوبت به سامانه برمی‌گشت. در این روش هوای احیا توسط انرژی خورشید گرم می‌شد. این روش می‌تواند کارایی سامانه را تا ۸۰ درصد از نظر مصرف انرژی بالا ببرد. چون وقتی هوا خیلی مرطوب باشد، فرایند گرم یا خنک کردن هوا همراه با مصرف زیاد انرژی است (Charles and Cromer, 2002).

در سال ۱۹۹۶ خشک کن خورشیدی مجهز به دو نوع ماده جاذب رس بنتونیت و کلرید کلسیم برای خشک کردن ذرت طراحی و ساخته شد. مواد جاذب در بالای بستر ذرت قرار داشته، دارای ۴۵٪ جذب رطوبت و در دمای ۴۵ درجه سلسیوس احیا می‌شدند (شکل ۲). فرآیند خشک کردن در طول روز با استفاده از هوای گرم شده توسط خورشید و در شب خشک کردن با استفاده از هوای به گردش درآمده از بین بستر ماده جاذب صورت می‌گرفت. خشک‌کن می‌توانست ۹۰ کیلوگرم ذرت تازه را در طی ۲۴ ساعت از رطوبت ۳۸ درصد به ۱۵ درصد برساند (Thoruwa T. F. N. *et al.*, 1996).

یک خشک‌کن خورشیدی آزمایشی که رطوبت زدایی هوا در شب به وسیله ماده جاذب رطوبت بنتونیت و کلرید کلسیم صورت می‌گرفت طراحی و ساخته شد. یک پنل فتوولتائیک و یک باطری ۱۲ ولتی به عنوان توان فن الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. رطوبت نسبی هوای احیا شده تقریباً ۴۰٪ از سطح اطراف و دمای افزایش یافته ۴ درجه سلسیوس بود. ماده جاذب رطوبت به وسیله شدت تابش خورشید در طول روز احیا می‌شد. این سامانه می توانست بیش از ۵۰٪ انرژی خورشیدی را استفاده کند (Thoruwa TFN *et al.*, 1998).

هودالی و بوگارد (۲۰۰۱) یک واحد خشک‌کن خورشیدی تونلی مجهز به سیلیکاژل طراحی کردند. این سامانه زمان خشک کردن را حدود ۸ ساعت کاهش داده و کیفیت محصول خشک شده را بهبود بخشید (Hodali and Bougard, 2001).

احمد و همکاران (۲۰۰۵) پارامترهای مربوط به چرخ جاذب را که برای احیا از انرژی خورشید استفاده می‌کرد، اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها بهترین ضخامت چرخ را ۱۸ تا ۲۶ سانتی‌متر، مقدار دبی جرمی و سرعت چرخش چرخ جاذب را به ترتیب ۱ تا ۵ Kg/min و ۱۵ تا ۶۰ دور بر ساعت (rph) و نست سطح احیا به سطح کل و درصد تخلخل چرخ جاذب را به ترتیب ۰/۳ تا ۰/۸ و ۰/۴ تا ۰/۷ برای دمای احیای ۶۰ تا ^{0}C ۹۰ گزارش کردند (Ahmed *et al.*, 2005).

در تحقیقی سامانه خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری با مواد جاذب (بنتونیت و کلرید کلسیم) ارتقا داده و عملکرد آن بررسی شد. نتایج نشان داد که عمل خشک کردن خیلی یکنواخت‌تر و کیفیت محصول خشک شده نیز بهتر بوده، در ضمن خصوصیات و ساختار ماده جاذب حتی پس از گذشت یک سال ثابت می‌ماند (Shanmugam and Natarajan, 2006).

ناگایا و همکاران (۲۰۰۶) سامانه خشک‌کن دما پایینی با ماده جاذب سیلیکاژل را برای خشک کردن سبزیجات طراحی کردند. آن‌ها دریافتند در خشک کردن به این روش، محصول خوب و یکنواختی به دست می‌آید به طوری که رنگ اولیه، شکل و بافت اصلی حفظ شده و مقادیر ویتامین سبزیجات در سطح بالایی می‌ماند. نرخ خشک کردن این سامانه ۶ برابر بیشتر از خشک‌کن‌های جاذب رطوبت مرسوم و بیش از ۱۲ برابر سریع‌تر از خشک کردن در آفتاب بود (Nagaya *et al.*, 2006).

در تحقیقی آینه منعکس کننده‌ای به کار گرفته شد تا تابش خورشید را روی بستر ماده جاذب متمرکز کند. استفاده از این آینه عملکرد خشک کردن ماده جاذب را تا ۲۰٪ بهبود بخشید و زمان خشک شدن برای آناناس و نخود سبز را به ترتیب ۴ و ۲ ساعت کاهش داد. تقریباً ۶۰٪ رطوبت محصول توسط جریان هوای گرم شده به کمک نور خورشید و ۴۰٪ بقیه به وسیله ماده جاذب از بین می‌رود.

مضیانون و همکاران (۲۰۰۷) برای خشک کردن قطعات نارگیل، سامانه خشک‌کن هوای گرم با چرخ جاذب گردان را توسعه دادند. سامانه خشک‌کن شامل دو مدار هوا بوده، مدار اول محصول را خشک و مدار دوم ماده جاذب را احیا می‌کند. دو گرمکن الکتریکی مجزا، هوای لازم برای احیا و خشک کردن محصول را گرم کرده و دو فن هوای لازم برای احیای سیلیکاژل و خشک کردن محصول را فراهم می‌کند. زمان خشک کردن این سامانه حدود ۲۵٪ در مقایسه با سامانه هوای داغ طبیعی کاهش یافت ولی انرژی سامانه ۴۰ تا ۸۰ درصد بالاتر از انرژی سامانه هوای داغ طبیعی بود. سهم انرژی مورد نیاز جهت احیا تقریباً ۴۰٪ از انرژی کل مورد استفاده بود. رطوبت نسبی ورودی خشک‌کن اثر معنی‌داری بر روی رنگ تکه‌های نارگیل خشک شده داشت (Madhiyanon *et al.*, 2007).

در تحقیقی، عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی با جریان هوای اجباری، مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته جهت خشک کردن نعناع بررسی شد. خشک‌کن مورد ارزیابی شامل جمع‌کننده‌ی خورشیدی، محفظه‌ی محصول، محفظه‌ی مواد جاذب رطوبت سیلیکاژل، دمنده، کانال‌های عبور هوا و سامانه‌ی اندازه‌گیری و کنترل بود. نتایج نشان داد که سامانه گردش هوای بسته تأثیر بسیار معنی‌داری بر انرژی مصرفی و بازده خشک‌کن دارد. افزایش دمای هوای خشک‌کننده در سامانه‌ی هوای باز، باعث کاهش زمان و بازده خشک شدن و افزایش انرژی مصرفی شد. در حالی که در سامانه‌ی گردش هوای بسته، با افزایش دما؛ انرژی مصرفی کاهش، بازده خشک‌کن و سرعت خشک شدن افزایش یافت (آق خانی و همکاران، ۱۳۹۲).

به منظور خشک کردن دانه‌های کاکائو توسط خشک‌کن خورشیدی مجهز به انباره حرارتی جاذب[1] از دو نوع ماده جاذب الک مولکولی ۱۳ (Na86 [(AlO2)86 (SiO2)106] 264H2O) و کلرید کلسیم استفاده شد. به دلیل وجود ماده جاذب در ساعات غیر آفتابی رطوبت هوای داخل محفظه خشک کن پایین‌تر از محیط بود؛ این شرایط باعث می‌شود که در این مواقع نیز فرآیند خشک شدن داخل محفظه خشک‌کن ادامه پیدا می‌کند. نتیجه مهم این پژوهش این بود که استفاده از این روش فرآیند خشک کردن را بسیار مؤثر از نظر زمان خشک شدن و مصرف انرژی ویژه می‌کند (Dina *et al*., 2015).

نتیجه‌گیری کلی

تحقیقات مذکور نشان می‌دهد که استفاده از مواد جاذب رطوبت در خشک‌کن‌های خورشیدی دارای مزایای زیادی در خشک کردن محصولات کشاورزی می‌باشد. به دلیل محدودیت ذخیره انرژی استفاده از مواد جاذب رطوبت با دمای احیای پایین ارجحیت دارد. مزایای خشک‌کن‌های جاذب رطوبت عبارتند از:

۱- خشک کردن پیوسته حتی در ساعات غیر آفتابی و شب؛ ۲- افزایش نرخ خشک شدن به سبب وجود هوای خشک و داغ؛ ۳- خشک کردن بسیار یکنواخت و افزایش کیفیت محصول خصوصاً برای محصولاتی که به حرارت حساسند؛ ۴- سادگی طراحی سامانه و عدم نیاز به نگهداری درازمدت؛ ۵- کاهش مصرف انرژی در مقایسه با سایر خشک‌کن‌ها؛ ۶- کاهش هزینه‌های راه‌اندازی سامانه به دلیل استفاده از انرژی خورشید یا گرمای تلف شده از صنایع برای احیای مواد جاذب رطوبت.

منابع

آق خانی، م ح. عباسپورفرد، م ح. بیاتی، م ر. مرتضی‌پور، ح. ساعدی، ا. و مقیمی، ع. ۱۳۹۲. بررسی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه گردش هوای بسته و محفظه جاذب رطوبت. نشریه ماشین‌های کشاورزی جلد ۳، شماره ۲، ص ۱۰۳-۹۲.

رهنما، م. ۱۳۸۹. طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن خورشیدی با چرخ جاذب رطوبت برای حفظ خواص کیفی خرمای رقم استعمران. رساله دکتری مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

زمزمیان، ا.م. ۱۳۸۷. کاربرد سامانه جاذب خورشیدی با چرخ رطوبت زدایی دوار برای خشک کردن. همایش ملی سوخت، انرژی و محیط زیست. تهران. پژوهشگاه مواد و انرژی.

نصیری، س. م. ۱۳۸۸. واحدهای فراوری محصولات کشاورزی (ترجمه). انتشارات نوید شیراز، چاپ اول

Afonso CF. 2006. Recent advances in building air conditioning systems. Applied Thermal Engineering 26: 1961-1971.

[1]- Desiccant Thermal Storage

Ahmed M, Kattab N, Fouad M. 2005. Evaluation and optimization of solar desiccant wheel performance. Renewable Energy 30: 305-325.

Anonymous. 2005. Microcooling, heating and power(M-Chp) instruction module. United State Department Of Energy, Mississippi Cooling, Heating, Power(MChp) and Bio-Fuel Center. First Printing.

Bal LM, Satya S, Naik S. 2010. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 2298-2314.

Belessiotis V, Delyannis E. 2011. Solar drying. Solar Energy 85: 1665-1691.

Charles, J. and Cromer, P. E. (2001). Using desiccant to transfer moisture in air conditioner increase efficincy and capacity. Solar Engineering Company. 460 Indian Creek Drive Cocoa Beach.

Chen H-H, Hernandez CE, Huang T-C. 2005. A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. Solar Energy 78: 97-103.

Chua K, Chou S. 2003. Low-cost drying methods for developing countries. Trends in Food Science & Technology 14: 519-5.۲۸

Clito, F. A. A. 2006. Recent advances in building air conditioning systems. Applied Thermal Engineering. V: 26. P: 1961–1971.

Czanderna A. 1990. Polymers as advanced materials for desiccant applications. Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA). Report no.

Dai Y, Wang R, Xu Y. 2002. Study of a solar powered solid adsorption–desiccant cooling system used for grain storage. Renewable Energy 25: 417-430.

Dina SF, Ambarita H, Napitupulu FH, Kawai H. 2015. Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. Case Studies in Thermal Engineering 5: 32-40.

Dubois D .1989 .Drying cut flowers and foliage. Farmnote/Western Australian dep. of agriculture.

Dubois, P. and Joyce, D. 2005. Drying cut flowers and foliage. Department of Agriculture Western Australia.

Fournier M, Guinebault A. 1995. The “shell” dryer—modelling and experimentation. Renewable energy 6: 459-463.

Handbook-Fundamentals A. 2005. Sorbents and Desiccants. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.

Henning H-M. 2007. Solar assisted air conditioning of buildings–an overview. Applied thermal engineering 27: 1734-1749.

Hodali R, Bougard J. 2001. Integration of a desiccant unit in crops solar drying installation: optimization by numerical simulation. Energy conversion and management 42: 1543-1558.

Jones, G., Smith, K., Thornton, M., Torres, J. and Williams, M. 2005. Desiccant wheel HVAC system delta smart house application, Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Duke University.

Johannsen A. 1981. Solar cooling and air conditioning. Progress in Energy and Combustion 1: 1850.

Madhiyanon T, Adirekrut S, Sathitruangsak P, Soponronnarit S. 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 46: 282-290.

Miller WM. 198 .۵Solar drying coupled with solid desiccant energy storage. Transactions of the ASAE 28: 649-0656.

Misha S, Mat S, Ruslan M, Sopian K. 2012. Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 4686-4707.

Nagaya K, Li Y, Jin Z, Fukumuro M, Ando Y, Akaishi A. 2006. Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control. Journal of food engineering 75: 71-77.

Neti S, Wolfe E. 2000. Measurements of effectiveness in a silica gel rotary exchanger. Applied Thermal Engineering 20: 309-322.

Parsons BK, Pesaran AA, Bharathan D, Shelpuk S. 1987. Evaluation of thermally activated heat pump/desiccant air conditioning systems and components. DRAFT, April.

Sabatelli V, Fiorenza G, Marano D. 2005. Technical status report on solar desalination and solar cooling. NEGST– new generation of solar thermal systems is a project financed by the European Commission DGTREN within FP6.

Saman, W. A. 2007. Review of solar cooling technologies. Sustainable Energy Centre, University of South Australia.

Shanmugam V, Natarajan E. 2006 .Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. Renewable Energy 31: 1239-1251.

Suk, M. K., Philomena, G. G. and Paul, O. M. 1980. Energy-efficient regenerative liquid desiccant drying process. United States Patent, No: 4189848.

Sumathy K. 2002. An energy efficient solar ice-maker. Proceedings of the 8th international symposium on renewable energy education (ISREE.(۸

Thoruwa T, Grant A, Smith J, Johnstone C. 1998. A solar-regenerated desiccant dehumidifier for the aeration of stored grain in the humid tropics. Journal of agricultural engineering research 71: 257-262.

Thoruwa T, Johnstone C, Grant A, Smith J. 2000 .Novel, low cost CaCl 2 based desiccants for solar crop drying applications. Renewable energy 19: 513-520.

Thoruwa TFN, Smith JE, Grant AD, Johnstone CM. 1996. Developments in solar drying using forced ventilation and solar regenerated desiccant materials .Renewable Energy 9: 686-689.

Wang R, Oliveira R. 2006. Adsorption refrigeration—an efficient way to make good use of waste heat and solar energy. Progress in Energy and Combustion Science 32: 424-458.