طراحی خشک کن بستر سیال خورشیدی و تأثیر تابش خورشیدی بر عملکرد خشک شدن

فاطمه ولی*[۱]، محمد امینی[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۰/۹/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۰/۱۱/۳

چکیده:

هدف این مقاله، طراحی یک خشک کن بستر سیال خورشیدی برای محصولات کشاورزی و بررسی عملکرد آن با توجه به میزان تابش خورشیدی می باشد. در این خشک کن به دلیل انتقال حرارت بالا، مواد با کیفیت مناسب، در مدت زمان کوتاه و با جایگزینی انرژی خورشید به جای سوخت های فسیلی برای گرمایش هوا، خشک می شوند. محصول انتخاب شده، ذرت بوده که اندازه متوسط ذرات، تخلخل بستر، چگالی توده ای و خالص از طریق آزمایش به دست آمده است. بر اساس رطوبت اولیه و ثانویه برای ذرت، به یک جمع کننده خورشیدی با توان حرارتی ۱/۶۶ کیلووات و دمنده حلزونی با دبی ۰/۱۴۶ متر مکعب در ثانیه نیاز داریم. هوای گرم با توجه به آب و هوای کرج از طریق ۵/۴ متر مربع جمع کننده تخت خورشیدی تامین می‌شود. آزمایش‌های خشک کردن در ارتفاع بستر ۱ سانتی متر، سرعت هوای ۳/۵ متر بر ثانیه، با دو نوع توزیع کننده هوا (قطر روزنه ۲و۴ میلی متر) و در زمان های قبل از ظهر، ظهر و بعد از ظهر برای بررسی عملکرد خشک کن انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد سینتیک خشک شدن ذرت تحت تاثیر نوع توزیع کننده هوا و زمان انجام آزمایش‌ها می باشد.

کلمات کلیدی:
تابش خورشیدی، محتوای رطوبت، نرخ خشک شدن، خشک کن بستر سیال خورشیدی

*۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه مواد و انرژی ftm.vali@gmail.com
۲) عضو هیأت علمی پژوهشگاه مواد و انرژی mohamedaminy@yahoo.co.uk

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

مقدمه

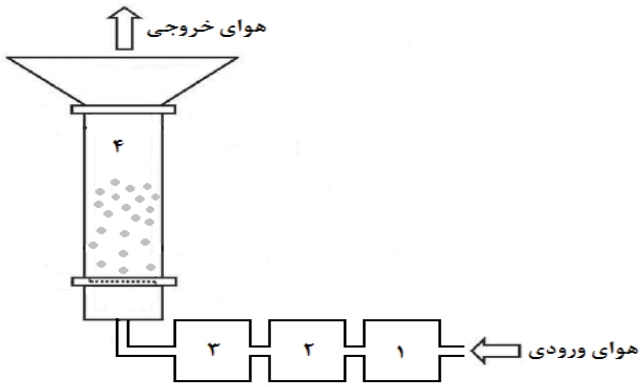
خشک کردن، مرحله مهمی در صنایع غذایی و شیمیایی می باشد. هدف اصلی در خشک کردن محصولات غذایی، حذف رطوبت از ماده تا میزان مطلوب می باشد که در آن فساد میکروبی و شیمیایی به حداقل برسد. معمولا این حذف رطوبت در حضور حرارت صورت می گیرد. محصولات خشک شده، فضای کمتری را اشغال کرده و هزینه های مربوط به بسته بندی، نگهداری و حمل و نقل کاهش می یابد. امروزه طیف وسیعی از محصولات خشک شده در دسترس بوده و مصرف آن در حال افزایش می باشد. خشک کردن محصولات تحت تابش مستقیم خورشید، روشی سنتی بوده که همچنان حتی برای محصولات با تناژ بالا نیز استفاده می شود. دلیل اصلی استفاده از این روش، هزینه بسیار کم آن می باشد، اما این روش معایبی نیز دارد، زیرا محصولات در معرض محیطی با گرد و غبار و حیوانات و پرندگان قرار می گیرند. در نوع سنتی، زمان خشک شدن بسیار طولانی بوده و کیفیت محصولات خشک شده همچون رنگ، ماندگاری، محتوای مواد مغذی، طعم و بو کاهش می یابد. از طرف دیگر، خرید دستگاه ها و ماشین آلات خشک کن و هزینه های جاری آن که معمولا تامین سوخت بوده، بالا می باشد. استفاده از خشک‌کن‌هایی که اکثر حرارت توسط انرژی خورشیدی تامین شود، مرتفع کننده این مشکل می باشد. در صنایع غذایی از خشک‌کن‌های متفاوتی مانند کابینتی، تونلی، دوار و... استفاده می شود اما در بعضی از این موارد، زمان خشک شدن طولانی بوده و باعث آسیب رساندن به بافت مواد می شود. در خشک‌کن بستر سیال به دلیل نرخ بالای انتقال حرارت و جرم ،سرعت خشک شدن بالا بوده و برای مواد حساس به دما مناسب می باشد.

اولین جرقه‌های علم سیالیت از سال ۱۹۴۵ میلادی بوده که تا سال ۱۹۷۵ میلادی روند منسجمی نداشته و پس از آن تا سال ۲۰۰۵ میلادی دانشمندان زیادی برای توسعه بهره گیری از این دانش در صنعت تلاش کرده و تجهیزات مربوطه در صنایع مختلف رشد فزاینده ای داشته اند[۸]. خشک‌کن‌های بستر سیال برای خشک کردن جامدات، مواد گرانولی، سوسپانسیون ها و دیگر مواد در صنایع غذایی، دارویی و شیمیایی به صورت صنعتی در حال استفاده می باشند. نوع و کارکرد خشک کن های بستر سیال برای هر ماده متفاوت از دیگری می‌باشد. به همین دلیل، بیش از ده ها نوع خشک کن بستر سیال اعم از خشک کن بستر سیال ناپیوسته، ارتعاشی، همزن دار، فواره ای، well-mixed ، plug-flow و... طراحی شده و در صنایع مختلف کاربرد دارند. خشک‌کن‌های بستر سیال با انرژی الکتریسیته و یا انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی کار می کنند، اما در این پژوهش با استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبع حرارتی هزینه های جاری مربوط به سوخت خشک‌کن‌ها بسیار کاهش یافته و در واقع، استفاده از انرژی پاک خورشیدی در کنار یکی از قدرتمندترین فناوری خشک‌کن‌ها باعث بهبود و مزایای بالای این خشک‌کن خورشیدی می‌باشد. خشک‌کن بستر سیال خورشیدی همچنین برای کشورهای گرمسیر که تابستانی طولانی داشته و میزان تابش خورشیدی بالا می باشد، بسیار مناسب است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

طراحی خشک کن بستر سیال خورشیدی

میزان تابش خورشیدی محل مورد نظر، کرج با عرض جغرافیایی ۳۵/۴۸ درجه شمالی، از اطلاعات ثبت شده توسط شیدسنج مدل CM22 دارای دیتالاگر۲ کاناله و حسگر میزان روشنایی روز با مدلBD-300 دارای تحلیلگر اطلاعات ۴ کاناله واقع درسایت خورشیدی پژوهشگاه مواد و انرژی به دست آمده است. برای طراحی، میانگین تابش خورشیدی در سطح افقی در ساعت ۱۳-۱۲ روز وسط ماه در ۶ ماهه بهار و تابستان سال های ۲۰۰۵-۲۰۰۰ برابر ۲۸۹۲/۳ کیلوژول به متر مربع در ساعت به دست آمده است. به دلیل کارکرد این خشک کن در بهار و تابستان، فصل برداشت ذرت، شیب ۲۵ درجه برای جمع کننده های خورشیدی به عنوان شیب بهینه در نظر گرفته شده است؛ شیب بهینه برای جمع کننده های خورشیدی در فصل تابستان ۱۰ درجه کمتر از عرض جغرافیایی و در زمستان ۱۰ درجه بیشتر از عرض جغرافیایی منطقه می باشد. میانگین تابش خورشیدی بر روی این شیب برابر ۳۰۶۰/۸ کیلوژول بر متر مربع در ساعت می باشد. میانگین دمای هوا در سال های ۲۰۰۵-۲۰۰۰ از اطلاعات هواشناسی کشور ۲۹/۹۵ درجه سانتی گراد به دست آمده است. اختلاف دمای ورودی و خروجی جمع کننده خورشیدی هوایی با توجه به اطلاعات کارکردی جمع کننده ها ۳۵-۱۰ درجه سانتی گراد گزارش شده است[۵]. حداقل میانگین افزایش دمای ثبت شده مربوط به جمع کننده های خورشیدی هوایی موجود در پژوهشگاه مواد و انرژی ۱۰ درجه سانتی گراد می‌باشد. در این طراحی نیز با توجه به شباهت ساختاری جمع کننده‌های خورشیدی، افزایش دما را ۱۰ درجه سانتی گراد در نظر می‌گیریم. با این فرض و میانگین دمای هوای محیط، خروجی جمع‌کننده تقریبا در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد می باشد. خواص هوای گرم در این دما از جداول ترمودینامیکی قرائت می شود. در شکل۱، طرح شماتیک این خشک کن با اجزای آن شامل فیلتر، هوا، جمع کننده های خورشیدی، دمنده هوا و محفظه بستر سیال نشان داده شده است. هوای محیط باگذر از فیلتر وارد جمع کننده های خورشیدی شده و دمای آن متناسب با شدت تابش خورشیدی منطقه افزایش می‌یابد، هوای گرم توسط دمنده با سرعت از طریق صفحه توزیع کننده هوا وارد بستر مواد شده و آن‌ها را به حرکت وا می‌دارد. انتقال حرارت و جرم مواد و هوای گرم باعث کاهش رطوبت در مواد می‌شود، پس از آن هوا به محیط تخلیه می‌شود.



شکل۱): طرح شماتیک خشک کن بستر سیال خورشیدی
۱: فیلتر هوا، ۲: جمع کننده های خورشیدی، ۳: دمنده هوا و ٤: محفظه بستر سیال

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

در این پژوهش، محصول کشاورزی برای طراحی خشک کن، ذرت در نظر گرفته شده است. یک نمونه صدتایی از مجموعه بزرگی از این محصول به طور تصادفی انتخاب شده و ابعاد آن توسط کولیس اندازه گیری شده است. ابعاد متوسط آن در این نمونه با توجه به قطر غربال برابر ۴/۱۹۸ میلی متر می‌باشد. کرویت این ذرات با استفاده از جدول کرویت برابر ۶۸٪ می‌باشد[۱۲]. برای تعیین تخلخل بستر ذرت از یک مکعب مربع یک لیتری استفاده می‌کنیم، ذرات را به طور معمول (نه بسیار فشرده و نه بسیار منبسط) درون این ظرف قرار می‌دهیم، جرم ذرات را نیز اندازه می گیریم. میزان حجم آب داخل ظرف به حجم کل ظرف میزان تخلخل بستر را می دهد. در آزمایشگاه این ضریب برابر ۰/۴۴ بدست آمده است. حال با داشتن جرم ذرت و حجم آن می توانیم چگالی توده ای و خالص را به ترتیب معادل ۶۱۳/۷۸۶۴ و ۱۰۹۶/۰۵ کیلو گرم بر متر مکعب محاسبه کنیم. در هنگام حداقل سیالیت، تخلخل بستر را از معادله (۱) معادل ۰/۴۷ به دست می آوریم [۱]:

$$\frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varphi^2\varepsilon_{mf}^3}=11 \qquad (۱)$$

برای ایجاد سیالیت کامل در بستر ذرات، باید دبی و سرعت مناسبی از هوای گرم را وارد بستر کنیم. سرعت ظاهری در شرایط حداقل سیالیت برای ذرات از طریق معادله (۲) به دست می‌آید [۹]:

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3\varphi}\left(\frac{d_s u_{mf}\rho}{\mu}\right)^2+\frac{150\left(1-\varepsilon_{mf}\right)}{\varepsilon_{mf}^3\varphi^2}\left(\frac{d_s u_{mf}\rho}{\mu}\right)=\frac{d_s^3\rho\left(\rho_s-\rho\right)g}{\mu^2} \qquad (۲)$$

حداقل سرعت سیالیت با حل معادله بالا ۱/۱۴ متر بر ثانیه به دست می آید. سرعت کاری در سیالیت کامل ۵-۳ برابر حداقل سرعت سیالیت می باشد [۷].

جمع کننده خورشیدی باید هوای گرم مورد نیاز برای کاهش رطوبت ذرت از ۶۰/۸٪ بر پایه تر به ۱۳٪ بر پایه خشک را تامین کند. این میزان رطوبت برای ماندگاری ذرت به مدت یک سال می باشد[۳].

دبی حجمی و جرمی هوای گرم با اطلاعات بدست آمده در بالاترین محدوده سرعت در بستری با قطر داخلی ۱۸/۰۸ سانتی متر، برابر ۰/۱۴۶ مترمکعب در ثانیه و ۰/۱۶۵ کیلوگرم در ثانیه می باشد. دمنده حلزونی باید قادر به تامین این دبی هوا باشد.

با در نظر گرفتن بازده ۴۰٪ برای جمع کننده تخت، مساحت سطح آن از معادله‌های (۳)و (۴) به دست می‌آید[۴]:

$$\dot{Q}=\dot{m}.C_p\Delta T \qquad (۳)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

$$\dot{Q} = I_T \eta . A_C \quad (۴)$$

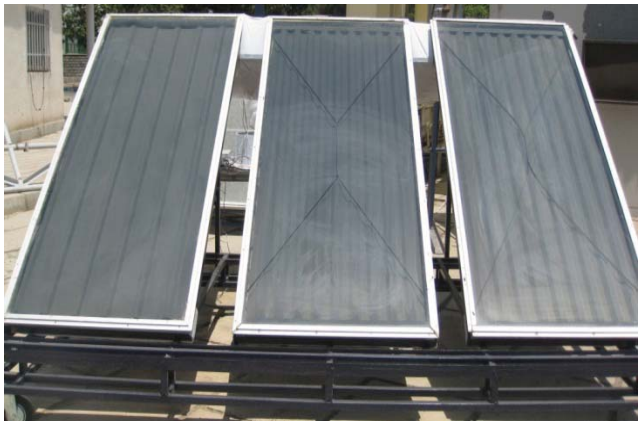
از این دو معادله به صورت مقادیر متوسط در یک بازه زمانی و یا لحظه ای می توان استفاده کرد. مساحت جمع کننده خورشیدی با احتساب ۱۰٪ ضریب اطمینان برابر ۵/۴ متر مربع می باشد.

محتوای رطوبت ذرت (جرم آب موجود در ماده به جرم ماده خشک) در طول آزمایشاها از معادله (۵) به دست می‌آید:

$$X(db) = \frac{M - M_d}{M_d} \quad (۵)$$

روش و دستگاه های آزمایش

جمع کننده خورشیدی از نوع پوشش دار و حرکت هوا از بالای صفحه جاذب می باشد. صفحه جاذب ورق آلومینیومی با شیارهای ذوزنقه ای و رنگ مشکی مات می‌باشد. برای کاهش اتلافات حرارتی زیر صفحه جاذب از عایق فومی استفاده شده است. سه جمع کننده خورشیدی در شیب ۲۵ درجه بر روی ساختار فلزی قرار گرفته اند. کانال هوا خروجی سه جمع کننده را به دمنده حلزونی (با دبی حجمی ۸۵۰ مترمکعب در ساعت، آمپراژ ۰/۹۵ آمپر، ولتاژ۲۲۰ ولت، فرکانس ۵۰ هرتز و توان ۱/۵ کیلووات) و پس از آن به محفظه خشک کن (استوانه پلکسی گلاس به قطر داخلی ۱۸/۰۸ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر) متصل می کند. هوای محیط با ورود به جمع کننده های خورشیدی گرم شده و توسط دمنده به داخل محفظه خشک کن فرستاده می‌شود و مواد موجود روی صفحه توزیع کننده محفظه خشک کن توسط هوای گرم شناور می‌شوند. بستر سیال، جمع کننده های خورشیدی هوا و تجهیزات مربوط به اتصال بر اساس طراحی های مربوطه ساخته شده و در شکل (۲) نشان داده شده است.



الف

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

ب

شکل ۲): الف ـ نمای روبروی خشک کن شامل جمع کننده های خورشیدی هوا
ب ـ نمای پشت خشک کن شامل محفظه بستر سیال، دمنده حلزونی، کانال هوا و تجهیزات اندازه گیری

آماده سازی نمونه های ذرت

محتوای رطوبت اولیه نمونه ها با خشک کردن آنها در آون در دمای ۱۳۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت تعیین شده است[۲]. نمونه های ذرت را داخل بستر ریخته و ارتفاع آن را اندازه گیری می کنیم، سپس نمونه ها را خارج کرده و وزن اولیه آن را ثبت می‌کنیم. در این مرحله، خشک کن را روشن کرده تا ۱۰ دقیقه بدون وجود مواد، هوای گرم از آن عبور کرده و به حالت پایدار برسد تا از اتلاف حرارت در طول آزمایش جلوگیری شود. حال می توان نمونه ها را درون بستر ریخته و آزمایش‌ها را شروع کرد. متغیرهای مورد مطالعه در این آزمایش‌ها نوع توزیع کننده هوا و زمان آزمایش می باشد. میانگین دمای هوای ورودی به بستر به میزان تابش خورشیدی در آن زمان و دمای محیط وابسته است. آزمایش‌های مربوط به عملکرد خشک کن در چندین دوره ۸ روزه در فصل تابستان سال ۱۳۹۰ انجام شده است، تمامی آزمایش‌ها روند یکسانی داشته و برای نمونه نتایج حاصل از آزمایش‌ها در تاریخ ۲۷ و ۳۱ تیر ماه ۱۳۹۰ (۱۸ و ۲۲ جولای ۲۰۱۱)، از ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۶:۳۰ ذکر می‌شود. در طی فرآیند خشک شدن برای یافتن نمودارهای مورد نظر باید جرم نمونه را بدانیم، برای این کار ابتدا هر یک دقیقه و سپس هر ۵ دقیقه جرم نمونه ها را ثبت می‌کنیم. مقادیر عددی متغیرهای مورد آزمایش در جدول ۱ ذکر شده است. با توجه به زمان آزمایش‌ها ظهر خورشیدی ساعت ۱۳:۱۵ محاسبه شده است.

جدول۱): متغیرهای مربوط به آزمایشات خشک کردن ذرت در خشک کن بستر سیال خورشیدی

آزمایش	A1	A2	A3	A4	A5	A6
قطر روزنه های توزیع کننده هوا (mm)	۴	۴	۴	۲	۲	۲
تاریخ انجام آزمایش	۲۷ تیر	۲۷ تیر	۲۷ تیر	۳۱ تیر	۳۱ تیر	۳۱ تیر
زمان انجام آزمایش	قبل از ظهر	ظهر	بعد از ظهر	قبل از ظهر	ظهر	بعد از ظهر

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

خشک کردن تحت تابش مستقیم خورشید

یک نمونه از ذرت بر روی یک صفحه استیل در یک لایه نازک تحت تابش مستقیم خورشید قرار داده شد تا پس از خشک شدن با نمونه خشک شده از خشک کن مقایسه شود. این نمونه هر روز به مدت ۶ ساعت تحت تابش مستقیم بود و شب هنگام در ظرفی جمع آوری می شد.

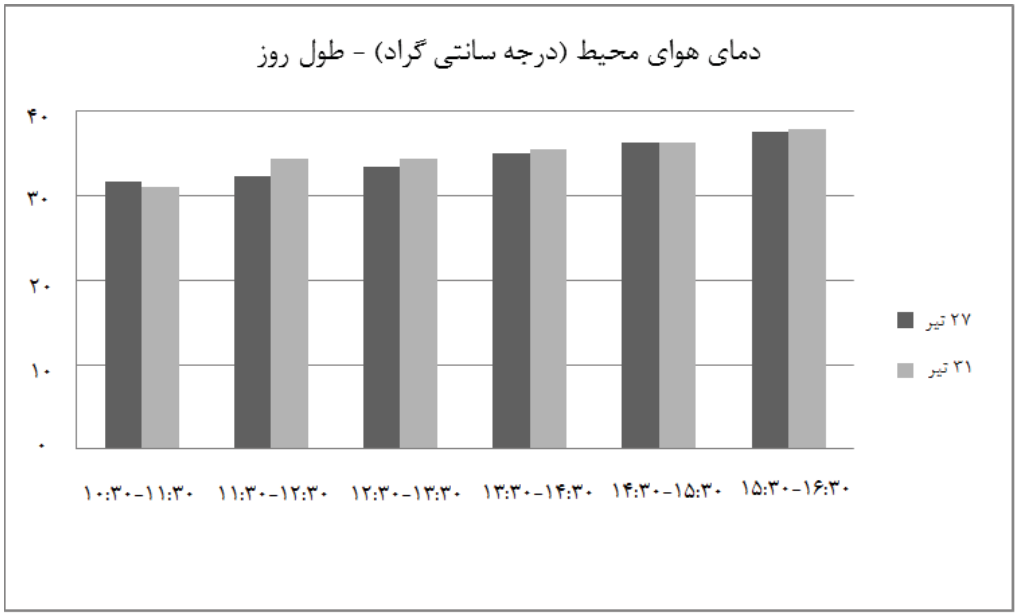
بحث و نتایج

تابش خورشیدی و دمای هوا در روزهای آزمایش

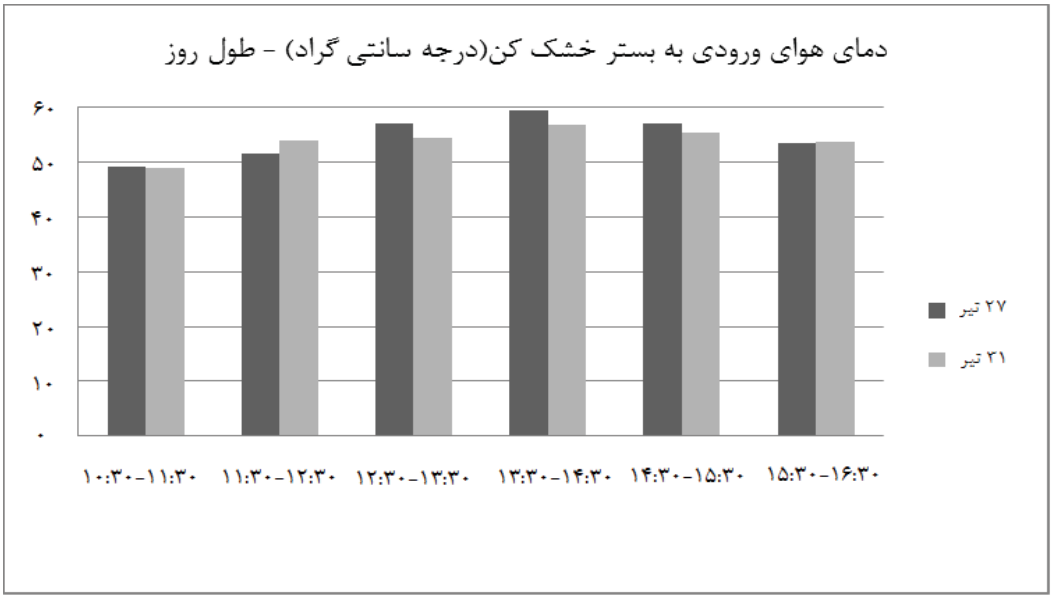
شکل۳ میانگین شدت تابش خورشیدی در هر یک ساعت از آزمایش را نشان می دهد. تابش خورشیدی در روزهای آزمایش از ساعت ۱۰:۳۰ تا زمان ظهر افزایش یافته و پس از آن تا بعد از ظهر کاهش می یابد. حداکثر میزان تابش معمولا در ظهر خورشیدی رخ می دهد. دمای هوای محیط، همان طور که در شکل۴ آمده است، به صورت هموار و پیوسته افزایش می‌یابد. جمع کننده های خورشیدی مورد استفاده در این خشک کن دمای هوای محیط را برای استفاده در محفظه خشک کن افزایش می‌دهند. دمای هوای ورودی به بستر در شکل ۵ نشان داده شده است. نمودارهای شکل ۵ تحت تاثیر میزان تابش خورشیدی و دمای هوای محیط می‌باشند. حداکثر مقدار این دما در ساعات ۱۵:۰۰– ۱۳:۳۰ رخ می دهد، به دلیل اینکه در این ساعات میزان تابش خورشیدی و دمای هوای محیط با هم حداکثر می باشند. با وجود تابش خورشیدی بالاتر در قبل از ظهر نسبت به بعد از ظهر، به دلیل دمای کم هوای محیط، دمای هوای ورودی به بستر کمترین مقادیر را داراست. در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ ساعت شروع یک بازه زمانی یک ساعته در محور افقی ذکر شده است.

شکل۳): میانگین شدت تابش خورشیدی (وات بر متر مربع) از ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱٦:۳۰

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]



شکل٤): میانگین دمای هوای محیط در ساعات ۱۰:۳۰ تا ۱٦:۳۰

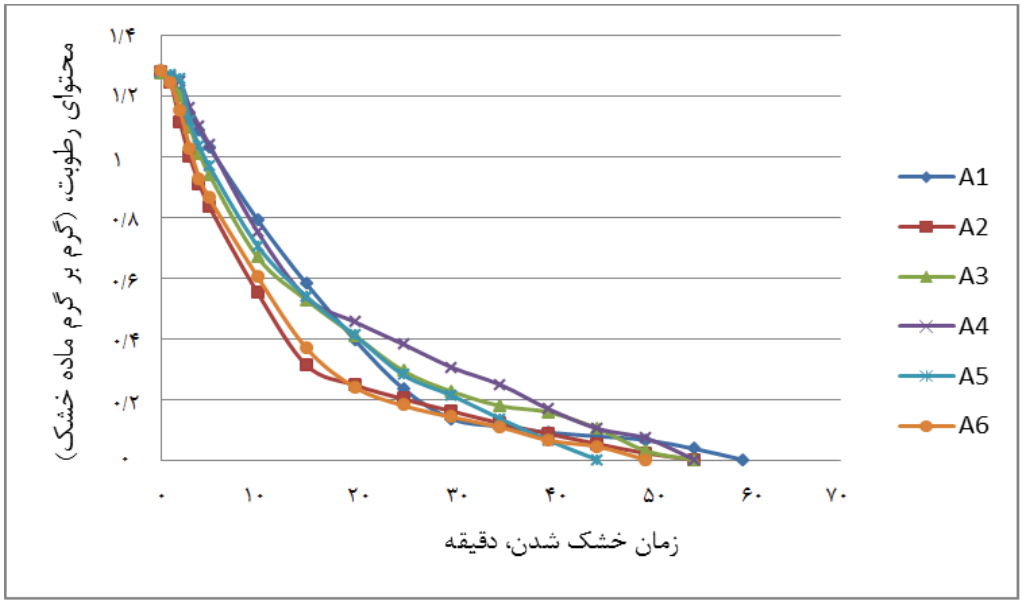


شکل٥): میانگین دمای هوای ورودی به بستر خشک کن در ساعات ۱۰:۳۰ تا ۱٦:۳۰

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

محتوای رطوبت در مقابل زمان

شکل۶ منحنی تغییرات محتوای رطوبت در مقابل زمان خشک شدن را در شرایط مختلف آزمایش نشان می‌دهد. محتوای رطوبت بر اساس گرم به گرم بر پایه خشک بیان شده است. زمان لازم برای رسیدن به محتوای رطوبت مورد نیاز، از این منحنی ها مشخص می شود. این شکل تاثیر نوع توزیع کننده هوا و زمان آزمایش را نشان می دهد. یافته های کلی مبنی بر این است که در یک ارتفاع بستر و سرعت ثابت استفاده از توزیع کننده با روزنه های بزرگتر زمان خشک شدن را افزایش می دهد. زمان تابش نیز بر سرعت و زمان خشک شدن تاثیر دارد و در دماهای بالاتر زمان خشک شدن کاهش می یابد. در سه مرحله از این آزمایش‌ها با دو نوع توزیع کننده هوا منحنی محتوای رطوبت و زمان خشک شدن تقریبا مشابه یکدیگر می‌باشند. همه آزمایش‌ها تقریبا منحنی ایده‌آلی را نشان می دهند. در دماهای بالا، انتقال حرارت و جرم بالا بوده و حذف رطوبت حتی در سرعت های پایین چشم‌گیر می باشد. در دماهای پایین نرخ انتقال حرارت کم بوده و سرعت هوا نقش اساسی در خروج رطوبت از مواد دارد. مشابه این نتایج در خشک کردن بادمجان بیان شده است [٦]. در تمامی آزمایش‌ها دمای هوای ورودی به بستر ثابت نمی‌باشد، زیرا میزان تابش خورشیدی و دمای محیط در هر لحظه تغییر می‌کند.

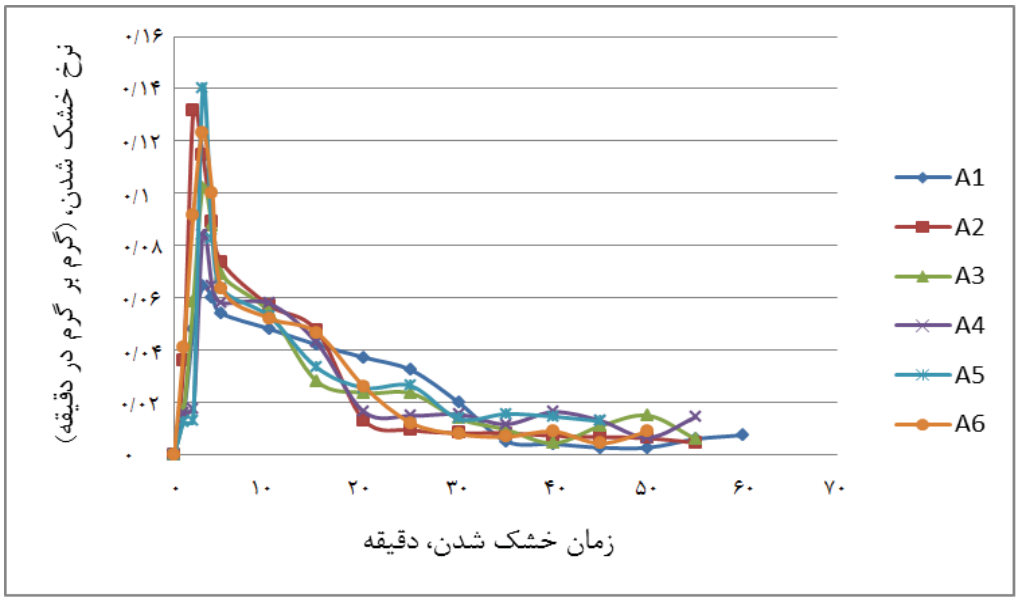


شکل٦): محتوای رطوبت ذرت بر پایه خشک در مقابل زمان خشک شدن در شرایط مختلف کاری

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

نرخ خشک شدن در مقابل زمان خشک شدن

سینتیک خشک شدن از منحنی نرخ خشک شدن در مقابل زمان به دست می آید. شکل۷ تغییرات نرخ خشک شدن بر پایه خشک را با زمان در شرایط مختلف کاری نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، نرخ خشک شدن همراه با گذر زمان و یا کاهش محتوای رطوبت کاهش می یابد. همان طور که قبلا اشاره شد، محتوای رطوبت محصول همراه با گذر زمان کاهش می یابد. جابجایی رطوبت از داخل ماده به سطح و نرخ تبخیر رطوبت از سطح ماده به هوا با کاهش محتوای رطوبت ماده، کاهش می یابد. در دماهای بالا، نرخ اولیه خشک شدن بالا بوده و در طول زمان کاهش می یابد. تفاوت در نرخ خشک شدن در شرایط مختلف کاری کاملا مشهود می باشد. این شکل نشان می دهد که نرخ خشک شدن در ظهر برای ارتفاع بستر ۱ سانتی متر، سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه و قطر روزنه ۲ میلی متری در مقایسه با دیگر شرایط بالا می باشد. با سرعت هوای ۳/۵ متر بر ثانیه، ارتفاع بستر ۱ سانتی متر و قطر روزنه ۴ میلی متر، قبل از ظهر کمترین نرخ خشک شدن گزارش شده است. به طور کلی، زمان خشک شدن با افزایش دمای هوا (که ناشی از تابش خورشیدی و دمای محیط می باشد) افزایش می یابد. نرخ خشک شدن با استفاده از روزنه ۴ میلی متری بسیار کمتر از توزیع کننده با قطر روزنه ۲ میلی متر می‌باشد.

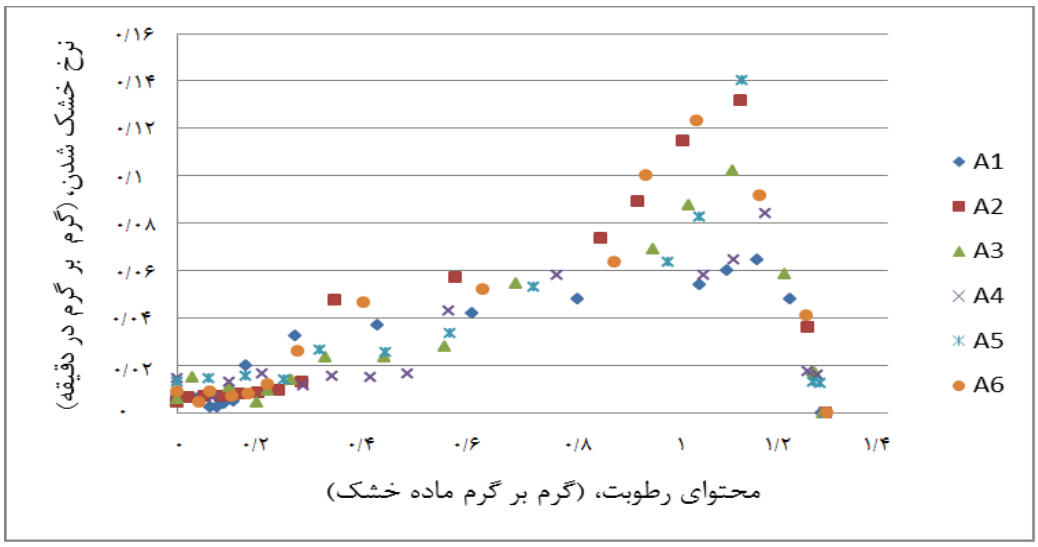


شکل۷): منحنی نرخ خشک شدن ذرت بر پایه خشک در مقابل زمان خشک شدن در شرایط مختلف کاری

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

منحنی اول و دوم خشک شدن

منحنی اول خشک شدن همان منحنی نرخ خشک شدن در مقابل محتوای رطوبت و منحنی دوم خشک شدن مشتق منحنی اول در مقابل محتوای رطوبت می باشد [١١]. شکل٨ منحنی اول خشک شدن را در شرایط مختلف کاری نشان می دهد. در این نمودارها، یک مرحله کوتاه اولیه مشخص است، اما مرحله خشک شدن با نرخ ثابت وجود ندارد. فقدان مرحله نرخ ثابت ممکن است به دلیل نبود فیلم نازکی از آب بر روی ماده باشد[١٠]. از شکل ٨ ، دو مرحله خشک شدن با نرخ نزولی مشخص می‌شود: مرحله نزولی اولیه و ثانویه، اگرچه مرحله گذر از نرخ نزولی اولیه به ثانویه کاملا مشخص نیست و مبهم می باشد. شکل٩ منحنی دوم خشک شدن را در شرایط مختلف کاری نشان می دهد. در این نمودارها، نقطه شروع منحنی در محتوای رطوبت اولیه از مقدار منفی بوده و نشان دهنده مرحله اول خشک شدن می باشد. بعد از آن، مقادیر افزایش یافته و با محور افقی تقاطع داشته که این نقطه تقاطع به نام محتوای رطوبت بحرانی اولیه X_{cr1} شناخته می‌شود. بعد از اینکه این مقادیر به حداکثر مقدار خود رسیدند، کاهش یافته و به محور افقی نزدیک می‌شوند. نقطه‌ای که منحنی دوم خشک شدن شروع به نزدیک شدن به محور افقی می کند به نام محتوای رطوبت بحرانی ثانویه X_{cr2} شناخته می شود. اگرچه یافتن این نقطه در این نمودار به نظر سخت می رسد، می توان مقدار عددی این دو محتوای بحرانی را از منحنی های اول و دوم خشک شدن به دست آورد. جدول٢ مقادیر محتوای رطوبت بحرانی اولیه و ثانویه بدست آمده از شرایط مختلف کاری را نشان می دهد.



شکل٨): منحنی اول خشک شدن در شرایط مختلف کاری

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

شکل۹): منحنی دوم خشک شدن در شرایط مختلف کاری

جدول۲): مقادیر محتوای رطوبت بحرانی اولیه و ثانویه در شرایط مختلف کاری

آزمایش‌ها	A1	A2	A3	A4	A5	A6
محتوای رطوبت بحرانی اولیه ، X_{cr1} (gr/gr db)	۱/۱۵۲۷	۱/۱۳۱۰	۱/۱۲۱۱	۱/۱۷۹۸	۱/۱۵۷۲	۱/۰۵۱۶
محتوای رطوبت بحرانی ثانویه ، X_{cr2} (gr/gr db)	۰/۱۰۹۹	۰/۱۶۰۳	۰/۱۷۷۷	۰/۲۴۷۱	۰/۴۱۰۱	۰/۱۴۰۸

مقایسه ذرت های خشک شده توسط خشک کن بستر سیال خورشیدی با ذرت های خشک شده تحت تابش مستقیم خورشیدی

مقایسه‌ای بین ذرت های خشک شده در خشک کن بستر سیال خورشیدی و تحت تابش مستقیم صورت گرفته است، زمان خشک شدن تحت تابش مستقیم برای یک نمونه ۵ روز و در هر روز ۶ ساعت بوده است و در مجموع، ۳۰ ساعت به طول انجامیده است. زمان خشک شدن تحت تابش مستقیم در مقایسه با خشک کن بستر سیال خورشیدی بسیار طولانی می باشد. شکل۱۰ نمونه ای از ذرت های خشک شده در هر دو شرایط را نشان می دهد. تفاوت رنگ در نمونه های خشک شده در این دو روش کاملا مشهود است. ذرت های خشک شده توسط خشک کن رنگ زرد تیره ای داشته، در صورتی که رنگ ذرت های خشک شده تحت تابش مستقیم قهوه ای می‌باشد که ممکن است بر اثر تابش مستقیم نوعی سوختگی در

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

آن به وجود آمده باشد. از نظر مزه، ذرت های تحت تابش مستقیم شیرینی کمتری نسبت به محصولات حاصل از خشک کن دارند. در مجموع، کیفیت ذرت های حاصل از خشک کن خورشیدی بالاتر می‌باشد.

الف

ب

شکل۱۰): مقایسه ذرت های خشک شده، الف) توسط خشک کن بستر سیال خورشیدی، ب) تحت تابش مستقیم خورشید

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، طراحی خشک کن بستر سیال برای محصولات کشاورزی دانه ای می باشد تا علاوه بر کاهش زمان خشک کردن و عدم آسیب به بافت مواد، از انرژی خورشیدی به عنوان منبع حرارتی استفاده شود و هزینه های جاری خشک کن کاهش یابد. طراحی این خشک کن با توجه به تابش خورشیدی ثبت شده مربوط به کرج و اندازه گیری خواص فیزیکی ذرت انجام شده است. برای کاهش رطوبت ذرت از ۶۰/۸٪ بر پایه تر به میزان نهایی، به ۵/۴ متر مربع جمع‌کننده خورشیدی هوایی و دمنده حلزونی با دبی دهی ۰/۱۴۶ متر مکعب بر ثانیه نیاز می‌باشد. آزمایش‌ها بر روی خشک‌کن ساخته شده با این طراحی نشان می دهد ذرت تازه را می توان در زمان کمی توسط خشک‌کن بستر سیال خورشیدی به محتوای رطوبت ۱۳٪ رساند که قابل استفاده به مدت یک سال می باشد. تاثیر زمان انجام آزمایش‌ها (تابش‌های متفاوت خورشیدی) و نوع توزیع‌کننده هوای گرم بررسی شده و نشان داده شد که در یک ارتفاع بستر و سرعت هوای ثابت، محتوای رطوبت ذرت در دماهای بالاتر سریعتر کاهش یافته و به تدریج در طول زمان کاهش می یابد. کمترین زمان خشک شدن مربوط به آزمایش A5 بوده که با قطر روزنه ۲ میلی متر و در زمان ظهر انجام شده است. مقادیر محتوای رطوبت بحرانی اولیه و ثانویه نیز از منحنی های اول و دوم خشک شدن به دست آمده است. این مقادیر تنها به نوع ماده مربوط نیست بلکه تابعی از شرایط عملکردی است و تفاوت در این مقادیر برای ذرت مربوط به شرایط خشک کردن می باشد. در طی خشک شدن، به دلیل نبود فیلم مایع بر روی ذرت دوره نرخ ثابت خشک شدن دیده نشده است، اما دوره گذرای اولیه و دوره نرخ نزولی اولیه و ثانویه در نمودارها کاملا مشهود است. با مقایسه ذرت های خشک شده از دو روش

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

متفاوت به این نتیجه می رسیم که کیفیت ذرت خشک شده توسط خشک کن بستر سیال خورشیدی نسبت به تابش مستقیم خورشیدی بسیار بالاتر بوده در عین حال زمان کمتری برای خشک شدن نیاز دارد.

فهرست علائم

A_C	مساحت جمع کننده خورشیدی ، m^2
C_p	ظرفیت حرارتی، $J/Kg.K$
d_s	اندازه ذره جامد، m
g	شتاب جاذبه زمین، m/s^2
I_T	تابش خورشیدی روی سطح جمع کننده خورشیدی، W/m^2
M	جرم نمونه ، gr
M_d	جرم نمونه خشک، gr
$\dot{m}$	دبی جرمی هوا، Kg/s
$\dot{Q}$	توان حرارتی، W
ΔT	اختلاف دما، K
u_{mf}	حداقل سرعت سیالیت، m/s
$X(db)$	محتوای رطوبت (مبنای خشک)
X_{Cr1}	محتوای رطوبت بحرانی اولیه، gr/gr
X_{Cr2}	محتوای رطوبت بحرانی ثانویه، gr/gr
ε_{mf}	تخلخل بستر در شرایط حداقل سیالیت، $\%$
ρ_s	چگالی جامد، Kg/m^3

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]

ρ	چگالی هوا، Kg / m^3
μ	ویسکوزیته هوا، $Kg / m.s$
η	بازده جمع کننده خورشیدی، %
φ	کرویت، %

منابع

[1] Arai, N., hori, I., Hasatani, M., Sugiyama,S. (1980), chemical engineering, Jap. 13,2.

[2] Ashrae (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.), (1985), fundamentals handbook, chapter 10.

[3] Ashrae (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.), (1972), fundamentals handbook, chapter 9.

[4] Duffie, J.A., and Beckman, W.A., (1980), Solar engineering of thermal processes, 2nd edition.

[5] Ekechukwu, O.V., and Norton, B. (1999), Review of solar-energy drying systems III: Low temperature air-heating solar collectors for crop drying application, Energy Conversion & management 40, p.657-667.

[6] Ertekin, C., Yaldiz, O. (2004), Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, Journal of Food Engineering, 63, p.349–359.

[7] Gupta. C.K., Sathiyamoorthy D. (1999), Fluid Bed Technology in Materials Processing.

[8] Horio, M. (2010), Fluidization science, its development and future, Particuology 8, p. 514–524.

[9] Kunii, D., Levenspiel, O. (1923), Fluidization Engineering, Second edition, Boston: Butterworth-Heinemann

[10]. McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P. (2001), Unit operations of chemical engineering, 6th edition, McGraw-Hill.

[11] Mujumdar, A.S., Devahastin, S. (2000), Fundamental principle of drying. In S. Dlm. Devahastin (Ed.), Mujumdar's practical guide to industrial drying. Montreal: Exergex Corporation

[12] Yang W., Mujumdar A.S., Devahastin S. (2003), Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-20]