بررسی خشک شدن شلتوک به روش لایه نازک و تعیین ضخامت بهینه با به کارگیری یک خشک‌کن خورشیدی آزمایشگاهی با جریان جا به جایی آزاد

علی زمردیان[۱] و علی‌رضا علامه[۲]

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.19.7]

چکیده

برنج پس از گندم مهم‌ترین منبع غذایی مردم ایران است. خشک کردن برنج پس از برداشت، به خاطر داشتن رطوبت بیش از حد مجاز در فراوری و یا انبارداری، لازم و ضروری است. در بیشتر مناطق برنج‌خیز ایران، این غله به صورت سنتی، با پهن کردن شلتوک در سطح گسترده و با عمق کم در برابر تابش خورشید خشک می‌شود، که نتیجه آن افزایش افت کمّی و کیفی محصول می‌باشد. زیرا شلتوک بدون هیچ گونه حفاظت و به مدت نسبتاً طولانی رها می‌شود، که سبب هدر رفتن محصول در اثر حملهٔ پرندگان و جوندگان، آلوده شدن به گرد و غبار، خطر باران‌های موسمی، و ایجاد تنش‌های حرارتی و رطوبتی می‌گردد. در این آزمایش خشک کردن شلتوک به روش لایه‌های نازک، با استفاده از یک خشک‌کن خورشیدی از نوع غیر فعال مختلط، که جریان هوا در آن به صورت جا به جایی آزاد (در اثر نیروهای محرک شناوری) برقرار می‌شود، با بهره‌گیری از معادلات نیوتن و پیج بررسی گردید. هدف اصلی این آزمایش بررسی شرایط خشک شدن برنج به روش لایه‌های نازک و تعیین ضخامت بهینه لایه بود.

داده‌های آزمایشگاهی گویای این است که ضخامت دو سانتی‌متری همگونی قابل قبولی با مدل‌های ریاضی حاکم بر خشک شدن به روش لایه‌های نازک دارد. بنابراین، می‌توان عمق دو سانتی‌متری را لایهٔ نازک به حساب آورد، در صورتی که عمق‌های بیشتر از دو سانتی‌متر چنین نتیجه‌ای را به دست نمی‌دهند.

واژه‌های کلیدی: *خشک‌کن خورشیدی، لایه نازک، شلتوک*

---

۱. استادیار مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. کارشناس ارشد مؤسسهٔ تحقیقات برنج کشور

مقدمه

برنج پس از گندم یکی از مهم‌ترین غلاتی است که نقش حساسی را در تغذیه مردم جهان و ایران ایفا می‌کند. بر پایهٔ گزارش سازمان خوار و بار کشاورزی جهانی (F.A.O)، در سال ۱۹۹۸ سطح زیر کشت برنج در دنیا ۱۵۰ میلیون هکتار، مقدار تولید آن ٥٦٨ میلیون تن و میانگین عملکرد آن برابر با ۳۸۰۹ کیلوگرم در هکتار بوده است. در ایران، در فصل زراعی ۷۷-۱۳۷٦ سطح زیر کشت برنج ٦١٥ هزار هکتار، مقدار تولید آن ۲/۷۷ میلیون تن و میانگین عملکرد در هکتار برابر با ٤٥٠٥ کیلوگرم برآورد شده است (۱). به علت کافی نبودن تولید داخلی، هرساله مقادیر زیادی برنج به ارزش میلیون‌ها ریال توسط دولت یا بخش خصوصی، برای تأمین نیاز مصرفی کشور از کشورهای خارج وارد می‌شود (۲).

محصول برنج (شالی) پس از برداشت کوبیده شده (به وسیلهٔ کمباین، خرمنکوب، و ادوات سنتی دیگر)، و این محصول که شلتوک (Rough rice-paddy) نام دارد، از فرایندهای چندی گذر می‌کند تا آماده استفاده گردد. رطوبت شلتوک حدود ۲۵-۳۵ درصد است و اگر با چنین رطوبت زیادی انبار شود، یا از فرایندهای تکمیلی بگذرد، دچار خسارات زیادی همچون کپک‌زدگی یا شکستگی دانه‌ها می‌شود (۵). از این رو، بایستی محصول شلتوکی را پیش از گذشتن از هر فرایندی تا رطوبت حدود ۱۳-۱٤ درصد خشک کرد (١٦ و ۱۹). خشک کردن شلتوک در خیلی از مناطق برنج‌خیز به صورت سنتی، یعنی خشک کردن در هوای آزاد و در برابر تابش مستقیم خورشید انجام می‌گیرد. این روش به دلیل نداشتن کنترل در چگونگی خشک شدن، غیر یکنواختی در فرایند خشک شدن و ایجاد تنش‌های حرارتی در حین خشک شدن، گاه بارندگی‌های بی‌موقع، نیاز به سطح وسیع، نیاز به کارگر فراوان، و هم‌چنین حمله حشرات، پرندگان و جوندگان در سطح مزرعه اقتصادی نیست.

اگر از انرژی پاک خورشید در شرایط کنترل شده‌ای استفاده شود، ضمن صرفه‌جویی در مصرف سوخت (مانند سوخت‌های فسیلی و انرژی الکتریسیته) باعث حفظ مؤثر محیط زیست می‌گردد. حفاظت از محیط زیست و به کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی) از وظایف اجتماع کنونی است، که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مهار یا انباشتن انرژی خورشید عموماً توسط دستگاه‌هایی به نام گیرنده (جمع‌کننده)های خورشیدی (Solar collectors) صورت می‌گیرد. برای خشک کردن فراورده‌های کشاورزی که به دمای نسبتاً کم (٤٠-٧٠ درجه سانتی‌گراد) نیاز است، استفاده از گیرنده‌های تخت تجویز می‌گردد، که از فناوری ساده‌ای نیز برخوردارند (۸).

نخستین بار امکان استفاده علمی از انرژی خورشیدی به منظور خشک کردن فراورده‌های کشاورزی توسط بوئلو (٦) بررسی گردید. در ابتدای دهه ۱۹٦۰، سابل و بوئلو (١٤) طرح‌هایی در باره گیرنده‌های خورشیدی برای گرم کردن هوا به منظور استفاده در خشک کردن فراورده‌های کشاورزی و بهبود دما در محل‌های نگهداری دام و طیور ارائه دادند. هال (۹) در گزارشی به پیش‌گرم کردن هوای تهویه یا گذراندن آن از زیر سقف اصطبل دام، و نیز به وسیله‌ای اشاره کرده است که با آن پرتو خورشیدی به طور مستقیم توسط محصولی که می‌بایست خشک گردد گرفته می‌شد. ولی تا پیش از سال ۱۹۷۳ به سیستم‌های خشک کننده واقعی که انرژی خورشیدی را به خدمت می‌گرفتند کمتر اشاره می‌شد. در سال ۱۹۷٦ پیترسون و هلیکسون (۱۳) سیستمی کارآمد ارائه و معرفی کردند که سبب برانگیخته شدن و توجه پژوهندگان به استفاده از انرژی خورشیدی برای خشک کردن فراورده‌های کشاورزی گردید.

موریسون (۱۰) در تلاش به منظور تأمین توان خشک کردن به طور ثابت، گیرنده‌های خورشیدی را با پمپ گرمایی الکتریکی ترکیب کرد. بدین ترتیب که برای گرم کردن هوای خشک کننده در طول روز از انرژی گرمایی خورشید استفاده می‌کرد و در طی شب یا هنگام ناکافی بودن تابش خورشیدی پمپ گرمایی به کار می‌برد. وی در آزمایش خشک کردن ذرت با دمای کم، به این نتیجه رسید که ترکیب پمپ گرمایی و گیرنده خورشیدی به طور مؤثر هزینه انرژی را در مقایسه با

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.19.7]

سیستم خشک کردن تنها به وسیله پمپ گرمایی در دمای کم کاهش می‌دهد.

استویزن و شریف (۱۱) به بررسی خشک شدن برنج به صورت لایه نازک در خشک‌کن‌های خورشیدی از نوع غیر فعال غیر مستقیم پرداختند.

زمان و بالا (۱۸) یک رشته معادلات تجربی برای خشک کردن خورشیدی شلتوک ارائه کردند. آنها از سه روش خشک کردن استفاده کردند، که عبارت بود از: خشک‌کن غیر فعال مختلط، خشک‌کن غیر فعال مستقیم و خشک کردن به روش سنتی. نتایج نشان داد که بیشترین سرعت خشک شدن با استفاده از خشک‌کن غیر فعال مختلط و کمترین سرعت خشک شدن مربوط به شیوه سنتی است.

بالا و ضیاء الدین (٤) مدلی ریاضی برای خشک کردن شلتوک به روش جا به جایی آزاد ارائه دادند. این مدل شامل برآورد تابش خورشیدی، دمای هوا در درون گیرنده صفحه تخت و پیش‌گویی تغییر رطوبت و دما در بستر دانه بود.

بالا و وودز (۳) با استفاده از یک خشک‌کن خورشیدی از نوع غیر فعال غیر مستقیم به بررسی خشک شدن شلتوک پرداختند . نتایج نشان داد که در سرعت‌های کم جریان هوا، به دلیل جا به جایی آزاد، جبهه خشک کننده به کندی حرکت می‌کند، و بستر دانه را به خاطر بیش از حد خشک شدن لایه زیرین نمی‌توان همگن و نازک در نظر گرفت. هم‌چنین، به علت افت دما در سرتاسر بستر، ارتفاع دودکش در توزیع نیروی شناوری اثر کمی دارد.

مواد و روش‌ها

در مورد به کارگیری خشک‌کن‌های خورشیدی برای خشک کردن شلتوک پژوهش‌های بسیاری صورت پذیرفته است، که همگی این خشک‌کن‌ها را برای تودهٔ انبوه به صورت لایه‌های عمیق در نظر گرفته‌اند. هم‌چنین، پژوهندگان برای عمق لایهٔ نازک تعاریف مختلفی ارائه داده‌اند. برخی عمق لایه نازک را ضخامت یک دانه می‌دانند، و بعضی عمق لایه نازک را آن عمقی از تودهٔ محصول می‌دانند که در آن هیچ اختلافی در رطوبت و دما مشاهده نشود.

در این پژوهش سعی شده است یک خشک‌کن خورشیدی از نوع غیر فعال مختلط (Mixed-mode passive solar dryer) به کار برده شده و برای خشک کردن یک واریته مهم برنج محلی (واریته چمپا) درعمق‌های مختلف، به قصد یافتن ضخامت لایهٔ نازک بستر بذر استفاده گردد. شایان ذکر است که هیچ پژوهنده‌ای با یک خشک‌کن خورشیدی از نوع به کار برده شده در این پژوهش، در صدد یافتن عمق بهینه که بتوان به آن لایه نازک اطلاق کرد برنیامده است.

یک گیرندهٔ (جمع کننده) خورشیدی ساده هوایی به کار رفت که از یک صفحه سیاه رنگ آلومینیم به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و به ابعاد ۱۵۰×۸۳ سانتی‌متر به عنوان صفحه جاذب با پوشش تک لایهٔ شیشه‌ای تشکیل شده بود. حرکت هوا در داخل گیرنده تحت نیروی شناوری (جا به جایی آزاد) صورت می‌پذیرد، و تخلیه هوای گرم از گیرنده به طرف ورودی هوا و به داخل محوطه خشک‌کن را مهیا می‌سازد (شکل ۱).

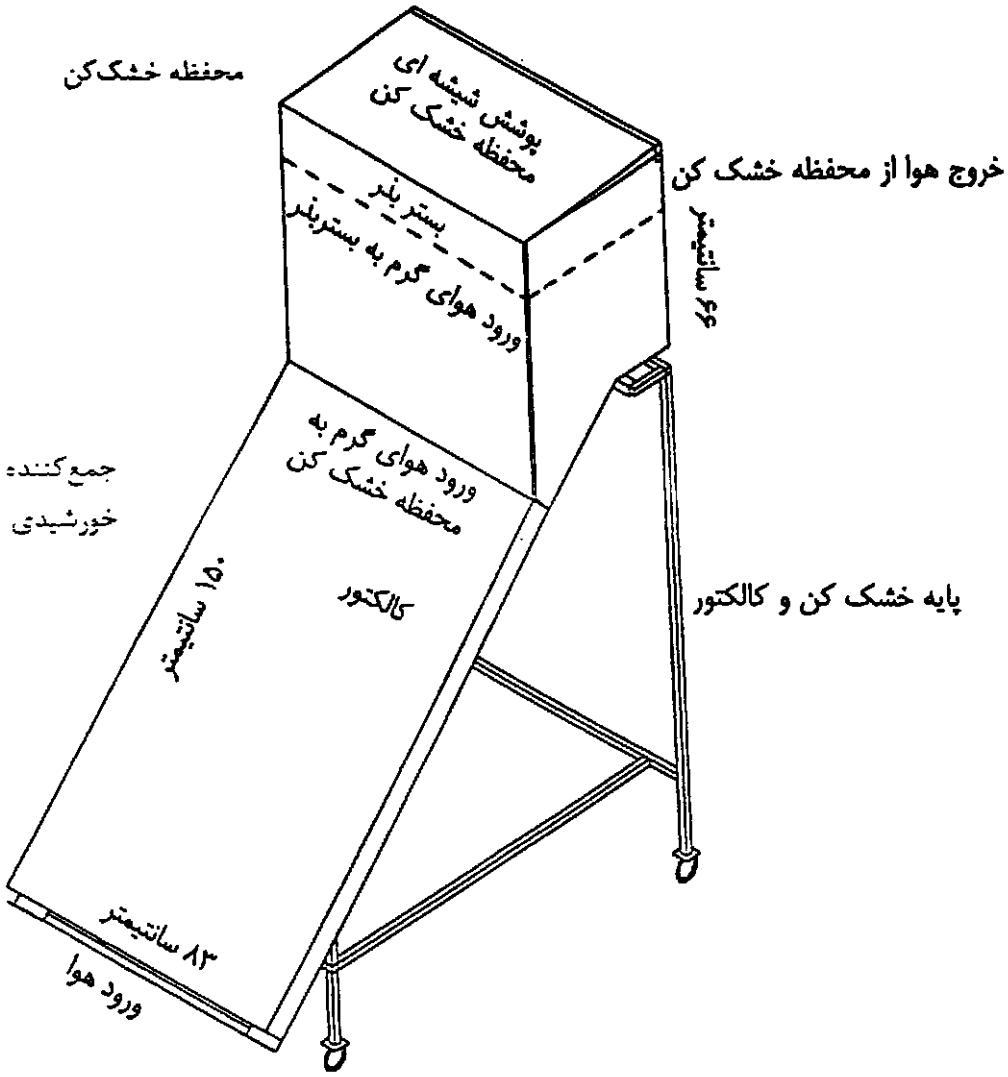
عمل اصلی خشک کردن در محفظه خشک‌کن انجام می‌گیرد. هوای گرمی که به روش جا به جایی آزاد از گیرنده خارج می‌شود در این قسمت با گذشتن از بستر دانه (به روش آزاد) رطوبت موجود در آنها را خواهد ربود. این قسمت یک محفظه چوبی به شکل مکعب مستطیل است، که از پایین به خروجی گیرنده متصل است (شکل ۱). چون خشک‌کن از نوع غیر فعال مختلط است، محصول می‌بایست در معرض پرتوهای مستقیم خورشیدی نیز قرار گیرد. به همین علت، در ناحیه بالایی محفظه خشک‌کن باید پوششی شفاف (شیشه به ضخامت چهار میلی‌متر) قرار داده شود تا پرتوهای خورشیدی از آن گذر کرده و مستقیم بر سطح بستر دانه بتابد.

یکی از قسمت‌هایی که تعبیه آن در یک خشک‌کن خورشیدی لازم است خروجی هوا یا دودکش است، که به دو منظور انجام می‌گیرد:

الف) هوای مرطوب از ناحیه خشک‌کن خارج شود.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.19.7]



شکل ۱. تصویر شماتیک خشک‌کن خورشیدی

ب) نیروی محرکه شناوری در داخل سیستم بر قرار کند.

بر پایهٔ پژوهش‌های انجام شده، ارتفاع دودکش تأثیر چندانی در عملکرد خشک‌کن ندارد، و تنها ناحیه‌ای برای خروج هوا کفایت می‌کند (۳). از این رو، در وجه پشتی محفظه خشک‌کن شیاری به ابعاد ۲/۵ × ۳۶/۵ سانتی‌متر تعبیه شده است تا هوای مرطوب از این قسمت خارج شود. برای ساختن بستر مخصوص نگهداری شلتوک در داخل خشک‌کن از یک سازه چوبی به ابعاد ۸۹×۴۹ سانتی‌متر استفاده شد. کف و لبه‌های این سازه تا ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر با توری ریز آلومینیمی پوشانده شد. این قاب به گونه‌ای در داخل محفظه خشک‌کن نصب گردید که بتوان آن را به راحتی به صورت کشویی از محوطه خشک‌کن خارج کرد. خارج کردن ظرف مزبور برای توزین شلتوک، و هم‌چنین تنظیم عمق مناسب انباشتگی محصول در ظرف توری صورت می‌گیرد. تنظیم عمق بذر با دقت زیادی در ۲، ٤ و ٦ سانتی‌متر انجام پذیرفت.

پس از تکمیل محفظه خشک‌کن، به منظور جلوگیری از تلف شدن گرما از خشک‌کن به محیط خارج، بدنه خشک‌کن با لایه‌هایی از پشم و شیشه به صورت مؤثر پوشانده شد. بستر بذر در فاصله حدود ٦٦ سانتی‌متری از دهانه خروجی گیرنده در محفظه خشک‌کن نصب شد. این فاصله بدین علت انتخاب

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.19.7]

گردید که هوای گرم شده توسط گیرنده و تحت نیروی شناوری به طور یک‌نواخت به بستر بذر وارد شود. برای توزین محصول در بستر خشک‌کن از یک ترازوی دقیق (۰/۱± گرم) استفاده گردید. به منظور به حداقل رساندن خطای آزمایش، خروج، توزین و ورود دوبارهٔ بستر بذر به داخل خشک‌کن طوری انجام می‌شد که کلاً کمتر از ۲۰ ثانیه طول بکشد.

گیرنده ساخته شده که به صورت سری به محفظه خشک‌کن نصب شده است، تحت زاویه ٤٥ درجه روی شاسی شیب‌دار نصب گردید (۸) و همراه خشک‌کن طوری رو به جنوب قرار داده می‌شد که در ظهر شرعی حداقل سایه را از خود به جا گذارد. با این کار، حداکثر انرژی خورشیدی در طول روز توسط گیرنده دریافت می‌گردید.

برای اندازه‌گیری دمای هوا در گیرنده و خشک‌کن از ترموکوپل‌های Type-T، (±1°C) استفاده شد. مناطق معینی از عبور هوا در گیرنده و بستر محصول (ورود و خروج هوا) در نظرگرفته شد که با قرار دادن ترموکوپل‌ها در مناطق یاد شده، استفاده از تقویت کننده ولتاژ (Amplifier) و کارت واسط داده‌برداری (Data logger) با کمک یک کامپیوتر، در فواصل معین زمانی دما در آن مناطق ثبت گردد. لازم به یادآوری است که تمام ترموکوپل‌ها پیش از استفاده به طور دقیق واسنجی گردیدند و برای ثبت دما توسط آنها از منحنی‌های رگرسیون مربوطه استفاده شد. دمای تر با استفاده از ترمومتر معمولی، که انتهایش با فتیلهٔ مرطوبی پوشیده شده بود، اندازه‌گیری گردید.

آزمایش‌های روزانه به روش زیر انجام گرفت:

۱. میانگین رطوبت اولیه بذر در آغاز هر آزمایش با استفاده از حداقل سه نمونه، و قرار دادن در کورهٔ حرارتی به مدت ٢٤ ساعت و دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد ثبت گردید.

۲. از همان تودهٔ محصول تا عمق دقیق ۲، ٤ و ٦ سانتی‌متر (هر روز یک عمق و هر عمق سه بار تکرار) روی توری بستر بذر ریخته می‌شد. با استفاده از یک کاردک، بذر درون بستر در عمق‌های معین به صورت یک‌نواخت پهن می‌گردید.

۳. بستر بذر با استفاده از ترازوی دقیق توزین، و در زمان معین درون خشک‌کن قرار داده می‌شد.

٤. پس از سپری شدن تقریباً هر ۳۰ دقیقه، بستر بذر خارج و توزین می‌گردید. این کار تا پایان آزمایش به طور دقیق انجام گرفت.

٥. در پایان هر دوره آزمایش، و برای هر عمق و هر تکرار، پنج نمونه از مکان‌های مختلف بستر نمونه‌برداری و تعیین رطوبت می‌شد.

٦. بیست و چهار ساعت پس از هر آزمایش، میانگین نتایج رطوبتی تعیین و ثبت می‌گردید. چون این نتایج رطوبت اولیه و انتهایی را مشخص می‌کرد، و در حین آزمایش هر ۳۰ دقیقه مقدار کاهش وزن اندازه‌گیری شده بود، نرخ خشک شدن در شرایط حاکم بر آزمایش قابل آزمون بود.

آگاهی از درصد رطوبت تعادلی شلتوک، در به کارگیری معادلات مختلف خشک کردن به طریقه لایه نازک لازم است. از این رو، روابط ریاضی به کار برده شده در محاسبه رطوبت تعادلی و نرخ خشک شدن به روش لایه‌های نازک به صورت زیر به کار رفت (۱٥):

$$RH=\exp\left[-K(t+C)(100M_e)^N\right] \quad [1]$$

که در آن RH برابر با رطوبت نسبی محیط (اعشاری)، M_e رطوبت تعادلی (درصد)، t دما (^oC)، و K، C و N ثابت‌هایی هستند که برای محصولات مختلف متفاوت است. این ضرایب ثابت برای شلتوک به صورت زیر گزارش گردیده است (٥):

$$K=1.9187\times10^{-5} \quad [2]$$

$$C=51.161 \quad [3]$$

$$N=2.4451 \quad [4]$$

معادلهٔ چانگ و فاست (۷):

$$M_e=E-F\,ln[-(t+C)\,ln\,(RH)] \quad [5]$$

که در آن ضرایب ثابت برای شلتوک به قرار زیر است (٥):

$$E=0.29394 \quad [6]$$

$$F=0.046015 \quad [7]$$

$$C=35.703 \quad [8]$$

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.19.7]

معادلهٔ زوریتس و سینگ (۵):

$$-\ln(RH) = -C_0 T^{C_1} \exp(C_2 T^{C_3} M_e) \quad [۹]$$

که در آن T درجه حرارت مطلق (K)، C_o، C_1، C_2 و C_3 ضرایب ثابت هستند که برای محصول شلتوک این ضرایب به صورت زیر گزارش گردیده است (۳):

$$C_0=3.88368\times10^{9} \quad [۱۰]$$

$$C_1=-3.52486 \quad [۱۱]$$

$$C_2=-1.1205\times10^{-2} \quad [۱۲]$$

$$C_3=1.30047 \quad [۱۳]$$

برای بررسی خشک شدن شلتوک به روش لایه‌های نازک از معادله‌های معروف زیر استفاده گردید (۵):

۱. معادلهٔ نیوتن

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-k\theta) \quad [۱۴]$$

که درآن :

MR = نسبت رطوبتی

M_e = درصد رطوبت تعادلی

M_o = درصد رطوبت اولیه

M = درصد رطوبت در زمان

k = ثابت خشک شدن

a = ثابت تجربی

۲. معادلهٔ پیج (۱۲) و وانگ و سینگ (۱۷)

$$MR=exp(-X\theta^{Y}) \quad [۱۵]$$

X و Y ثابت‌هایی هستند که به ویژگی ماده مورد نظر بستگی دارند.

خشک‌کن همراه با گیرنده در کارگاه‌های بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شیراز ساخته و تجهیز شد، و در محوطه باز بخش (واقع در باجگاه)، در ماه‌های مهر و آذر سال ۱۳۷۷ برای تعیین عمق بهینهٔ خشک شدن به روش لایه‌های نازک با استفاده از انرژی خورشید آزمایش گردید. آزمایش‌ها در سه ضخامت بستر (۲، ٤ و ٦ سانتی‌متری) انجام گردید تا حالت یا حالت‌هایی که به روش لایه نازک نزدیک‌تر است تعیین شود. آزمایش‌ها هر روز ساعت ده صبح آغاز، و حدود ساعت سه بعد از ظهر پایان می‌گرفت.

نتایج و بحث

برای هر کدام از مدل‌های خشک شدن (مدل نیوتن و مدل پیج) به روش لایه‌های نازک، با در نظر گرفتن سه معادله مهم مربوط به محاسبه درصد رطوبت تعادلی شلتوک (معادلات ۱، ۵ و ۹) با استفاده از روش رگرسیون (به کارگیری نرم افزار SPSS)، معادلات معینی برای پیش‌بینی روند خشک کردن شلتوک ارائه گردید، که در جداول ۱ و ۲ آمده است.

همان گونه که نتایج جداول ۱ و ۲ گواهی می‌دهد، با در نظر گرفتن سه معادلهٔ معروف برای محاسبهٔ رطوبت تعادلی (معادلات ۱، ۵ و ۹) و تعیین مقادیر آنها، و قرار دادن ارقام فوق در معادلات مربوط به خشک شدن به روش لایه‌های نازک، بهترین ضرایب مربوط به معادلات حاکم بر لایه‌های نازک برنج با استفاده از نرم افزار SPSS تعیین گردید. با داشتن مقادیر آزمایشی (مقدار رطوبت و زمان پیشرفت خشک شدن) و قرار دادن این مقادیر در معادلات فوق (معادلات ١٤ و١٥) نتیجه گرفته شد که ارقام به دست آمده برای عمق بستر دو سانتی‌متری با مقادیر تئوری حاصل از معادلات خشک شدن به روش لایه‌های نازک برای هر سه معادلهٔ درصد رطوبت تعادلی همگونی خاصی دارد (منحنی‌های ۱ و ٤)، در صورتی که داده‌های آزمایشی برای عمق‌های ٤ و ٦ سانتی‌متری فاصلهٔ زیادی با آنچه توسط معادلات تئوری به دست می‌دهد دارد (منحنی‌های ۲، ۳، ۵ و ٦). این مطلب برای معادلات نیوتن و پیج صحت دارد. ولی خطای استاندارد در محاسبات (استخراج شده از به کار گیری نرم‌افزار SPSS) معادلهٔ نیوتن به مراتب کمتر از خطای محاسبه شده از معادلهٔ پیج است. هم‌چنین، می‌توان نتیجه گرفت که چون داده‌های مربوط به ضخامت‌های ٤ و ٦ سانتی‌متری از معادلات لایه‌های نازک پیروی نمی‌کنند، خشک شدن محصول با این ضخامت عمق بستر دیگر رفتار خشک شدن لایه‌های نازک را ندارد، و توصیه می‌گردد برای بررسی روند خشک شدن در این ضخامت‌ها از معادلات مربوط

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

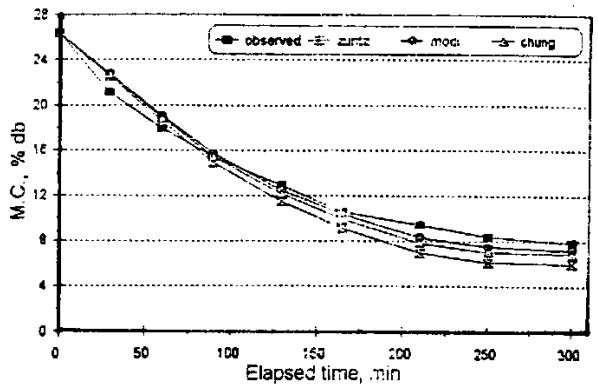
[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.19.7]

جدول ۱. روابط به دست آمده برای خشک شدن لایه نازک با استفاده از مدل‌های مختلف رطوبت تعادلی ویژه معادله نیوتن

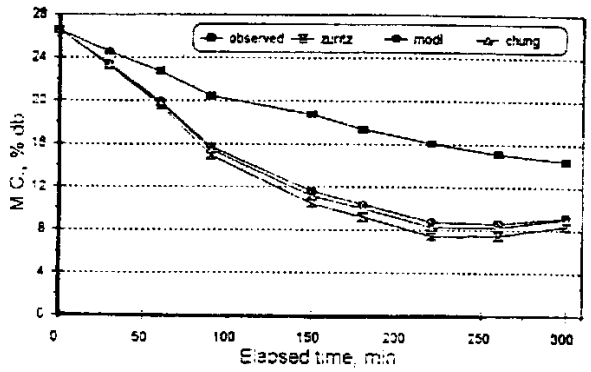
	خطای استاندارد	R^2	مدل رطوبت تعادلی		
			چانگ و فاست (۷)	هندرسون (تصحیح شده)(۵)	زوریتس و سینگ (۵)
۱	۰/۰۰۰۳۹	۰/۹۷۲۳			MR=0.8617exp(-0.00611θ)
۲	۰/۰۰۰۴۱	۰/۹۷۹۵		MR=0.8807exp(-0.00758θ)	
۳	۰/۰۰۰۳۸	۰/۹۷۹۶	MR=0.8751exp(-0.00703θ)		

جدول ۲. روابط به دست آمده برای خشک شدن لایه نازک با استفاده از مدل‌های مختلف رطوبت تعادلی ویژه معادله پیج

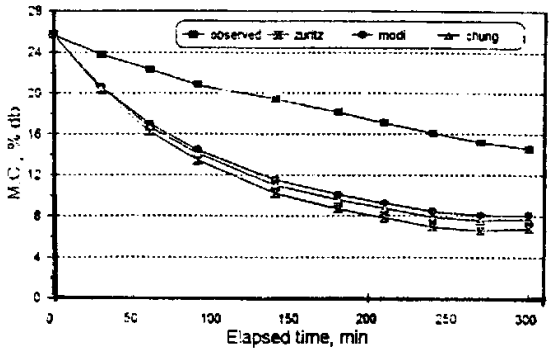
	خطای استاندارد	R^2	مدل رطوبت تعادلی		
			چانگ و فاست (۷)	هندرسون (تصحیح شده) (۵)	زوریتس و سینگ (۵)
۱	۰/۰۲۴۲	۰/۹۹۴۵			$MR=\exp(-0.0203950^{0.799552})$
۲	۰/۰۲۵۷	۰/۹۹۴۷		$MR=\exp(-0.017651\theta^{0.859807})$	
۳	۰/۰۲۳۳	۰/۹۹۵۴	$MR=\exp(-0.018645\theta^{0.83748})$		



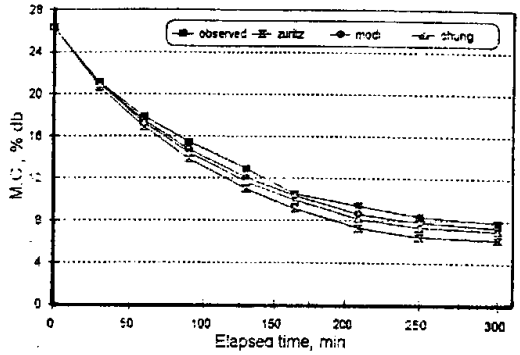
منحنی ۱. تغییرات رطوبت بر حسب زمان داده‌های آزمایشی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله نیوتن برای بستر دو سانتی‌متری



منحنی ۲. تغییرات رطوبت بر حسب زمان داده‌های آزمایشی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله نیوتن برای بستر چهار سانتی‌متری



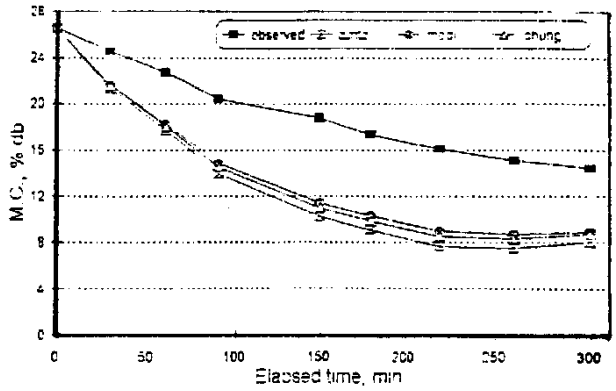
منحنی ۳. تغییرات رطوبت برحسب زمان داده‌های آزمایشی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله پیج برای بستر شش سانتی‌متری



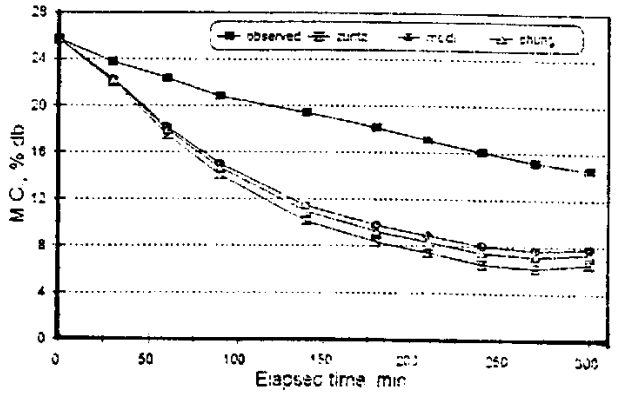
منحنی ٤. تغییرات رطوبت برحسب زمان داده‌های آزمایشی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله پیج برای بستر دو سانتی‌متری

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.19.7]



منحنی ۵. تغییرات رطوبت بر حسب زمان داده‌های آزمایشی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله پیج برای بستر چهار سانتی‌متری



منحنی ٦. تغییرات رطوبت بر حسب زمان داده‌های آزمایشی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله نیوتن برای بستر شش سانتی‌متری

به لایه‌های ضخیم استفاده کرد. هم‌چنین، از نتایج آزمایش می‌آید که در بستر خشک‌کن، یک‌نواختی در عمل خشک شدن وجود دارد و بستر بذر نسبت به ورود هوای گرم شده از گیرنده به محفظه آرام کنندهٔ خشک‌کن در موقعیتی قرار داشت که هوای گرم به طور یک‌نواخت از بستر بذر عبور می‌کرده است.

منابع مورد استفاده

۱. بی نام. ۱۳۷۷. بانک اطلاعات کشاورزی جهان. اداره کل آمار و اطلاعات وزارت کشاورزی.

۲. بی نام. ۱۳۷۸. آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۷۷-۱۳۷٦. اداره کل آمار و اطلاعات وزارت کشاورزی.

3. Bala, B. K. and J. L. Woods. 1994. Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. Solar Energy 53: 259-266.
4. Bala, B. K. and A. T. M. Ziauddin. 1990. Simulation of solar drying of rough rice. Proc. of the 1st World Renewable Energy Congress, Reading, UK.
5. Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema and C. W. Hall. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. The AVI Pub. Co., New York.
6. Buelow, F. H. 1958. Drying grain with solar energy. Mich. State Univ., Agric. Exp. Stn. Q. Bull. 41: 421-429.
7. Chung, D. S. and H. B. Pfost. 1967. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Trans. ASAE 10: 549-557.
8. Duffie, J. A. and W. A. Beckman. 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
9. Hall, C. W. 1980. Drying and Storage of Agricultural Crops. The AVI Pub. Co., Inc., Westport.
10. Morrison, D. W. 1977. Solar energy heat pump low temperature grain drying. Unpublished MSc. Thesis, Univ. Illinois.
11. Oosthuizen, P. H. and A. Y. Sheriff. 1988. Development of an improved indirect natural convective solar rice dryer. Proc. of the 14th Annual Conf. of the Solar Energy, Society of Canada, Inc., Ottawa , Ontario, Canada.
12. Page, C. 1949. Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers. Unpublished MSc. Thesis, Purdue Univ., West Lafayette, IN.
13. Peterson, W. H. and M. A. Hellickson. 1976. Solar electric drying of corn in south Dakota. Trans. ASAE 19: 349-353.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.19.7]

14. Sobel, A. T. and F. H. Buelow. 1963. Galvanized steel roof construction for solar heating. Agric. Eng. 44: 312-313, 316-317.
15. Thompson, T. L. 1967. Predicted performances and optimal designs of convection grain dryers. Unpublished Ph. D. Thesis, Purdue Univ., West Lafayette, IN.
16. Verma, L. R., R. A. Bucklin, J. B. Endan and F. T. Wratten. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. Trans. ASAE 28: 226-230.
17. Wang, C. Y. and R. P. Singh. 1978. A single layer drying equation for rough rice. Paper No. 78- 3001, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, Michigan.
18. Zaman, M. A. and B. K. Bala. 1989. Thin layer solar drying of rough rice. Solar Energy 42: 167-171.
19. Zomorodian, A. 1979. Thin and thick layer drying characteristics for Iranian rough rice varieties . Unpublished MSc. Thesis, Farm Machinery Dept., Shiraz Univ., Shiraz, Iran.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.19.7]