بررسی ارتباط زمان و ثابت سرعت خشک‌شدن (K) با پارامترهای خشک‌کن و ضایعات (درصد شکستگی) برنج در مرحلهٔ تبدیل

مجید سلیمانی[۱] و محمد شاهدی[۲]

چکیده

یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر کیفیت تبدیل یا به عبارتی ضایعات ناشی از خرد شدن برنج در مرحلهٔ تبدیل به برنج سفید و در نتیجه ارزش اقتصادی آن، نحوهٔ اعمال فرایند خشک‌کردن و کنترل پارامترها در خشک‌کن می‌باشد. به منظور بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت تبدیل محصول و ارتباط آنها با یکدیگر، رقم بینام که یکی از ارقام متداول برنج استان گیلان با کیفیت تبدیل و مقاومت بافتی متوسط است، با رطوبت اولیه ۲۰/۵٪ مورد استفاده قرار گرفت. فرایند خشک کردن محصول در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۰ تیمار توسط ۳ فاکتور: درجه حرارت هوای خشک‌کن(در پنج سطح: ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد)، سرعت جریان هوای خشک‌کن (در دو سطح ۰/۵ و ۲ متربرثانیه) و رطوبت شلتوک در انتهای فرایند (در دو سطح ۱۰/۵ و ۱۴ درصد بر پایه تر، به ترتیب معادل ۱۱/۷ و ۱۶/۳ درصد بر پایه خشک) در ۴ تکرار انجام شد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که افزایش درجه حرارت و سرعت جریان هوا در خشک‌کن باعث کاهش زمان و برعکس باعث افزایش ثابت سرعت کاهش رطوبت(K) در محصول می‌شود. هم‌چنین مشخص شد کاهش رطوبت نهایی محصول علی‌رغم این که باعث افزایش معنی‌دار زمان فرایند می‌شود ولی بر ثابت K اثر معنی‌دار ندارد. آزمون هم‌بستگی نشان داد که در دامنهٔ رطوبتی مشخص(۲۰/۵٪ الی ۱۴٪ و یا ۲۰/۵٪ الی ۱۰/۵٪) میزان ضایعات (درصد شکستگی) برنج در مرحلهٔ تبدیل با زمان خشک شدن هم‌بستگی منفی و با ثابت K هم‌بستگی مثبت دارد در حالی که این دو شاخص با مقاومت خمشی محصول به ترتیب هم‌بستگی مثبت و منفی دارند. برازش خصوصیات کیفی شامل ضایعات در مرحلهٔ تبدیل و مقاومت خمشی محصول برحسب زمان و یا ثابت سرعت خشک شدن مشخص کرد که با استفاده از متغیر زمان می‌توان برآورد دقیق‌تری برای خصوصیات کیفی مذکور به دست آورد.

واژه‌های کلیدی: فرایند خشک‌کردن، شلتوک، تبدیل، سینتیک خشک‌شدن، کیفیت

مقدمه

از جمله روش‌هایی که برای کاهش رطوبت برنج قابل استفاده می‌باشد و به خصوص در مناطق با رطوبت بالا (به علت بالا بودن رطوبت نسبی هوا، روش‌های طبیعی دارای کارایی پایین هستند) بیشتر کاربرد دارد، استفاده از خشک‌کن‌های مکانیکی است. در این خشک‌کن‌ها با استفاده از جابه‌جایی

۱. عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی، دزفول

۲. استاد علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]

اجباری هوای گرم، سرعت افت رطوبت در محصول افزایش پیدا می‌کند و در زمان خشک‌شدن صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای صورت می‌گیرد. ولی چنانچه این فرایند به صورت کنترل نشده انجام شود منجر به افزایش ضایعات در مرحلهٔ تبدیل شلتوک به برنج سفید و در نتیجه کاهش ارزش اقتصادی محصول می‌شود زیرا در مرحلهٔ پوستگیری و سفید کردن ، نیروهای خمشی و سایشی به محصول وارد می‌شوند و برای سالم ماندن و ممانعت از خرد شدن شلتوک ، لازم است که از مقاومت خمشی و کششی لازم برخوردار باشد تا ضایعات به حداقل برسد (۵ و ۲۰).

اگرچه افزایش ظرفیت خشک‌کن از طریق افزایش سرعت خشک شدن و افزایش پارامترهایی مثل درجه حرارت و سرعت جریان هوا امکان‌پذیر است ولی چنانچه این افزایش به صورت کنترل نشده و فقط به منظور صرفه‌جویی در زمان انجام شود، می‌تواند منجر به افت کیفیت تبدیل محصول و در نتیجه کاهش بازده برنج سالم و ضرر اقتصادی گردد (۵).

از جمله عواملی که بر کیفیت تبدیل یا به عبارتی خرد شدن برنج مؤثر است، تنش‌هایی است که در نتیجهٔ دفع رطوبت در آن ایجاد می‌گردد. کانز و چادهری پژوهشی را در ارتباط با تأثیر دفع رطوبت بر تنش‌ها و مقاومت بافتی این محصول انجام دادند. طی این بررسی به این نتیجه رسیدند که در مرحلهٔ خشک‌شدن، سلول‌های خارجی دانه با از دست دادن رطوبت، کاهش حجم داده و چروکیده می‌شوند. در این حالت قسمت‌های داخلی و مرکزی دارای محتوای رطوبتی بالاتر نسبت به قسمت‌های سطحی هستند. این پدیده منجر به ایجاد تنش کششی در سطح و تنش تراکمی در مرکز دانه می‌شود که خود می‌تواند با ایجاد ترک در محصول مقاومت آن را در مقابل نیروهای خمشی و یا کششی کاهش دهد. البته این حالت معمولاً در شرایطی اتفاق می‌افتد که نوسانات رطوبتی در دانه یعنی دفع رطوبت با سرعت انجام گیرد. به عبارتی چنانچه پدیده‌های جذب و یا دفع رطوبت به آرامی انجام شود، امکان ایجاد پدیدهٔ نامطلوب ترک‌خوردگی کمتر خواهد بود (۱۱ و ۱۲).

مطالعات نشان داده دانه برنج در محتوای رطوبتی بالاتر از رطوبت بحرانی (که مقدار آن در ارقام مختلف از ۱۴ تا ۱۸ درصد متغیر است) در مقابل صدمات ناشی از انقباض و انبساط به دست آمده از تغییرات عوامل محیطی و یا تغییرات رطوبت بذر مقاوم است در حالی که در رطوبت پایین‌تر از رطوبت بحرانی، در مقابل عوامل مذکور به شدت حساس می‌باشد (۷ و ۱۳).

در سال ۱۹۹۴ توسط پتی و همکاران مطالعه‌ای در ارتباط با بهینه‌سازی فرایند خشک‌کردن برنج صورت گرفت. در این مطالعه از ۲ متغیر درجه حرارت و ظرفیت تبخیر هوای خشک‌کن در سرعت جریان هوا معادل ۲ متر بر ثانیه استفاده شد و رطوبت نهایی محصول به ۱۴٪ بر پایهٔ تر رسانده شد. از جمله نتایجی که در این بررسی به دست آمد این بود که هر دو عامل درجه حرارت و ظرفیت تبخیر هوای خشک‌کن بر زمان فرایند تأثیر معنی‌دار دارند (۱۹). به عنوان مثال در دمای ۴۵ °C هنگامی که ظرفیت تبخیر هوا از ۲/۱ به ۴/۲ گرم بر کیلوگرم افزایش یابد، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت مورد نظر ۵ برابر کاهش پیدا می‌کند و چنانچه ظرفیت تبخیر هوا از ۲/۱ به ۷/۲ گرم بر کیلوگرم افزایش یابد، زمان لازم برای افت رطوبت حدود ۹ برابر کاهش می‌یابد. در این بررسی مشخص شد که افزایش دمای هوای خشک‌کن در حالتی که ظرفیت تبخیر هوا پایین است، تأثیر محسوس بر افزایش شکنندگی و ضایعات تبدیل ندارد ولی با افزایش ظرفیت تبخیر، تأثیر افزایش دما بر افزایش ضایعات بیشتر می‌شود. هم‌چنین در دمای ثابت، افزایش ظرفیت تبخیر منجر به افزایش شکنندگی و ضایعات تبدیل می‌شود (۱۹). هم‌چنین طی مطالعه‌ای مشخص شد افزایش درجه حرارت در فرایند خشک شدن از عوامل بسیار مؤثر در افزایش درصد شکستگی دانه در مرحلهٔ تبدیل می‌باشد که البته می‌توان تا حدودی با کاهش ظرفیت تبخیر هوای خشک‌کن از اثر نامطلوب آن کاست (۸).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]

لیو و سیبنمرگن در سال ۱۹۹۵ جهت جایگزین نمودن روشی مناسب به جای روش مستقیم تبدیل شلتوک به برنج سفید و تعیین کیفیت تبدیل، دو روش را مورد بررسی قرار دادند. آنان آزمون خمشی (Bending test) و نیز آزمون فشاری را به وسیلهٔ دستگاه اینستران (Instron) روی ۳ شکل برنج یعنی شلتوک، برنج قهوه‌ای و برنج سفید مربوط به دو رقم مورد مطالعه قرار دادند. آنان هم‌بستگی کیفیت تبدیل (که با شکنندگی رابطهٔ عکس دارد) را به دو روش مذکور بررسی کردند و نتایج نشان داد که نیروی فشاری (Compression test) جهت شکستن نمونه در هیچ یک از سه شکل این محصول، هم‌بستگی خوبی با کیفیت تبدیل ندارد ولی نیروی خمشی در لحظهٔ شکستن نمونه برای برنج قهوه‌ای و شلتوک هم‌بستگی خوبی با کیفیت تبدیل دارد (۱۵).

در سال ۱۹۹۷ چن و همکاران تحقیقی در مورد تأثیر پارامترهای خشک‌کن بر مقدار K (ثابت سرعت خشک‌شدن) و نیز ضایعات تبدیل انجام دادند. آنان گزارش کردند که افزایش ظرفیت تبخیر هوای خشک‌کن باعث افزایش مقدار ثابت K و در نهایت منجر به افزایش ضایعات محصول در مرحله تبدیل می‌شود (۶).

اهداف این تحقیق عبارت‌اند از: الف) ارتباط زمان و ثابت سرعت خشک شدن (K) با پارامترهای خشک‌کن، ب) هم‌بستگی زمان کاهش رطوبت و ثابت K با مقاومت خمشی و ضایعات (میزان شکستگی) در مرحلهٔ تبدیل، ج) ارائهٔ مدل برای برآورد ضایعات و مقاومت خمشی با استفاده از زمان و یا ضریب K.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش سعی شد از رقمی استفاده شود که از نظر مقاومت بافت، وضعیت متوسط داشته باشد یعنی نه آن‌قدر سخت باشد که تیمارها بر آن بی‌اثر باشند و نه آن‌قدر مقاومت بافت آن کم باشد که به‌آسانی تحت تأثیر عوامل محیطی قرار گیرد. به همین علت از رقم بینام که از ارقام برنج دانه بلند استان گیلان است، استفاده شد (۲ و ۹). محصول در کیسهٔ پلی‌اتیلن به آزمایشگاه انتقال یافت و در دمای ۵ °C نگه‌داری گردید. رطوبت نسبی محیط آزمایشگاه در تهران توسط دستگاه رطوبت‌ساز تا حد ۵۰٪ افزایش داده شد تا به شرایط محیطی شمال نزدیک شود. رطوبت اولیهٔ آن با استفاده از اتو در دمای ۱۳۰ °C تا رسیدن به وزن ثابت (۱۶ ساعت) تعیین شد که معادل ۲۰/۵٪ بر پایه تر بود (۳ و ۱۰).

آزمایش‌های خشک‌شدن محصول در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از عوامل دمای هوا (در پنج سطح : ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد)، سرعت جریان هوای خشک‌کن (در دو سطح : ۰/۵ و ۲ متر بر ثانیه) و رطوبت نهایی محصول (در دوسطح : ۱۴ و ۱۰/۵درصد که به ترتیب معادل ۱۶/۲۸ و ۱۱/۷۲ درصد برپایه خشک هستند) انجام شد. بنابراین در مجموع ۲۰ تیمار و هر تیمار در ۴ تکرار به‌طور هم‌زمان در ۴ دستگاه خشک‌کن (هر یک مجهز به دمنده سانتریفوژی و توان تولید جریان هوا تا سرعت ۲ متر برثانیه و سیستم کنترل دما با دقت ۱± °C) اعمال گردید. وزن نمونه در هر تکرار حدود ۲۵۰ گرم با عمق بستر ۴ سانتی‌متر در نظرگرفته شد. تغییرات میزان رطوبت برای هر تکرار بر اساس توزین وزن به فاصلهٔ زمانی ۱۰ دقیقه و موازنه جرم ماده خشک صورت می‌گرفت تا این که در نهایت رطوبت نمونه به مقدار مورد نظر برسد. پس از این مرحله، هر نمونه به‌طور جداگانه داخل کیسه‌های پلی‌اتیلنی سه‌لایه ریخته شد تا با محیط اطراف تبادل رطوبت وجود نداشته باشد.

به منظور تعیین رطوبت نسبی هوای خشک‌کن در هر دما ، از چارت سایکرومتری استفاده به عمل آمد که در دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب رطوبت نسبی معادل ۴۵، ۲۵/۸، ۱۵/۷، ۸/۷ و ۶ درصد بود. برای تعیین رطوبت تعادلی در هر وضعیت معادلهٔ چانگ $M = E - F\ln(-(T + C)\ln(P_v / P_s))$ مورد استفاده قرار گرفت که در آن M رطوبت تعادلی، T دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و Pv/Ps رطوبت نسبی محیط به اعشار می‌باشد. E، F و C

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]

ضرایب ثابت هستند (۵). کاربرد رطوبت تعادلی برای تعیین کسر رطوبتی یعنی $MR = (M - M_e)/(M_. - M_e)$ می‌باشد که در این رابطه M رطوبت نهایی، $M_.$ رطوبت اولیه و Me رطوبت تعادلی محصول بر پایه خشک می‌باشند. در نهایت مقدار K از رابطهٔ $MR = \exp(-K\theta)$ محاسبه شد که θ زمان لازم برای افت رطوبت محصول و ثابت K در واقع ضریب زاویهٔ منحنی تغییرات لگاریتم کسر رطوبتی (MR) بر حسب زمان است.

پس از این مرحله، آزمایش‌های مربوط به تعیین مقاومت خمشی و تعیین ضایعات در مرحلهٔ تبدیل به برنج سفید صورت گرفت. برای تعیین مقاومت خمشی از دستگاه اینستران مدل ۱۱۴۰ ساخت انگلیس استفاده شد. بدین منظور دو سر دانه شلتوک برنج روی دو تکیه‌گاه قرار می‌گرفت و تیغهٔ (Probe) متصل به سنسور دستگاه که به ثبت‌کننده (Recorder) متصل بود با سرعت ۳۰ میلی‌متر در دقیقه به سمت پایین حرکت داده می‌شد تا در وسط دانه میان دو تکیه‌گاه، نیرو را وارد کند (۱۵ و ۱۶). نیروی واردشده توسط ثبت‌کننده، روی کاغذ مخصوص ثبت می‌شد و در نقطهٔ شکستن دانه به پیک خود می‌رسید که معادل با مقاومت خمشی شکست آن بود.

به منظور تعیین میزان ضایعات (درصد شکستگی) در مرحله تبدیل، از هر نمونه ابتدا ۱۵۰ گرم شلتوک به دستگاه پوست‌کن غلتک لاستیکی (ساخت کمپانی ساتاکه ژاپن با متوسط پوست‌گیری ۹۸/۵ در رطوبت ۱۰/۵٪ و ۹۷/۸ در رطوبت ۱۴٪) و برنج قهوه‌ای به دست آمده به دستگاه سفیدکن سایشی (ساخت کمپانی ساتاکه ژاپن) انتقال یافت. عمل پولیش‌زنی هر نمونه در دستگاه سفیدکن به مدت ۳ دقیقه انجام گرفت و پس از این مرحله نسبت وزنی دانه‌های با طول کمتر از سه چهارم طول دانهٔ کامل به شلتوک اولیه مشخص شد و برای بیان ضایعات (میزان شکستگی) به صورت درصد محاسبه گردید (۵ و ۲۰).

محاسبات آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و Excel انجام گرفت.

نتایج

الف) تغییرات زمان و ثابت سرعت خشک‌شدن در ارتباط با پارامترهای خشک‌کن

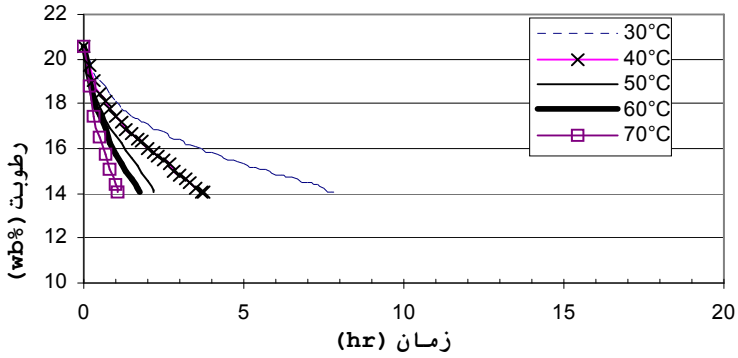
منحنی‌های رطوبتی حاصل از تیمارهای اعمال شده در شکل‌های ۱ الی ۴ ارائه شده است. آنچه در این نمودارها به وضوح قابل مشاهده می‌باشد، این است که در هر نمودار، افزایش درجه حرارت هوای خشک‌کن منجر به افزایش شیب یا کاهش طول منحنی و در نتیجه کاهش زمان لازم برای از دست دادن رطوبت می‌شود. نکتهٔ دیگر این که در دمای ثابت و رطوبت نهایی یکسان، افزایش سرعت جریان هوا در خشک‌کن از ۰/۵ به ۲ متر بر ثانیه باعث مقداری افزایش در شیب منحنی و در نتیجه کوتاه شدن منحنی و کاهش زمان می‌شود. در ارتباط با کاهش رطوبت نهایی از ۱۴٪ به ۱۰/۵٪ در وضعیتی که پارامترهای سرعت جریان هوا و درجه حرارت ثابت هستند مشاهده می‌کنیم که شیب منحنی ثابت می‌ماند و طولانی‌تر شدن منحنی مربوط به افزایش زمان لازم برای کاهش بیشتر رطوبت تا ۱۰/۵٪ می‌باشد.

پس از انجام تجزیه واریانس مشخص شد که اثر تیمارهای اعمال شده (۲۰ تیمار) بر زمان و ثابت سرعت خشک شدن (K) در سطح ۱٪ معنی‌دار است. میانگین مقادیر مربوط به زمان خشک شدن محصول ، کسر رطوبتی و ثابت K و مقایسهٔ حاصل از آنها با استفاده از آزمون دانکن در جدول ۱ ارائه شده است (۱۷).

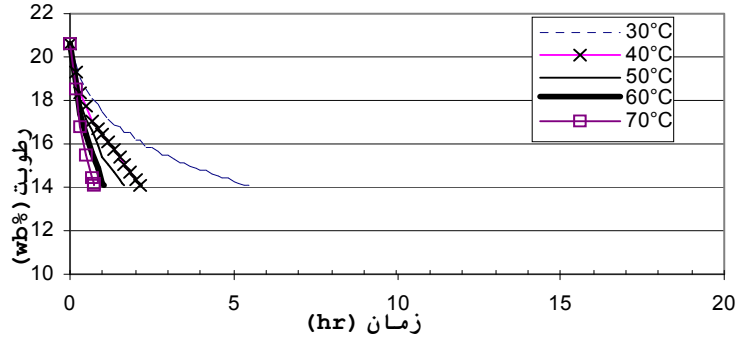
این جدول بیانگر این مطلب است که زمان کاهش رطوبت محصول تابعی از هر ۳ عامل رطوبت نهایی محصول، سرعت جریان و درجه حرارت هوای خشک‌کن می‌باشد. به طوری که در این جدول دیده می‌شود در سطوح یکسان سرعت جریان هوا و رطوبت نهایی، افزایش دما در دامنهٔ ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد در تمام سطوح منجر به کاهش معنی‌دار زمان خشک‌شدن شده است. هم‌چنین در تیمارهایی که رطوبت نهایی و درجه حرارت یکسان است، افزایش سرعت جریان هوا باعث

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

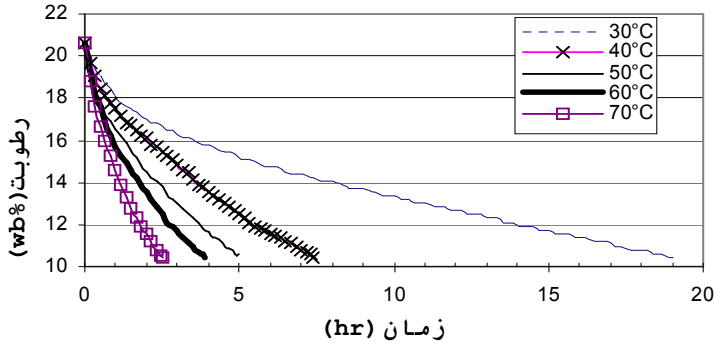
[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]



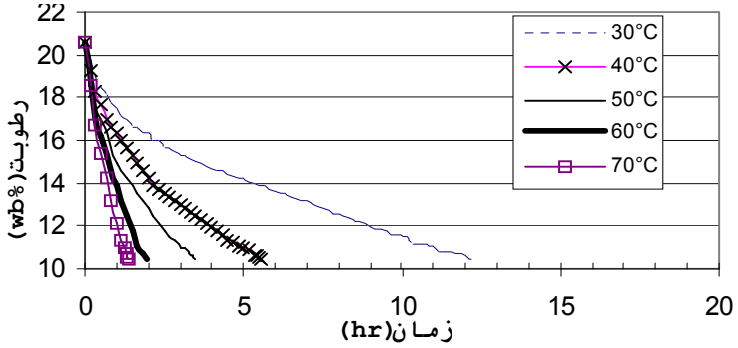
شکل ۱. منحنی‌های رطوبتی در دماهای مختلف و سرعت جریان ۰/۵ متر برثانیه (رطوبت نهایی ۱۴٪)



شکل ۲. منحنی‌های رطوبتی در دماهای مختلف و سرعت جریان ۲ متر برثانیه (رطوبت نهایی ۱۴٪)



شکل ۳. منحنی‌های رطوبتی در دماهای مختلف و سرعت جریان ۰/۵ متر برثانیه (رطوبت نهایی ۱۰/۵٪)



شکل ۴. منحنی‌های رطوبتی در دماهای مختلف و سرعت جریان ۲ متر برثانیه (رطوبت نهایی ۱۰/۵٪)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]

جدول ۱. مقایسه میانگین زمان خشک‌شدن، ثابت K، مقاومت خمشی و ضایعات (درصد شکستگی) در تیمارهای خشک‌شدن

تیمار	زمان (hr)	کسررطوبتی(MR)	ثابتK (1/hr)	مقاومت خمشی (N)	ضایعات (شکستگی) (٪)
$a_1b_1c_1$	۷/۸۳^{c}	۰/۳۴۸	۰/۱۳۵^{k}	۱۱/۱۸^{a}	۶/۰۴^{l}
$a_1b_1c_2$	۳/۷۵^{gh}	۰/۴۶۲	۰/۲۰۶^{ij}	۱۰/۵۴^{ab}	۷/۹j^{k}
$a_1b_1c_3$	۲/۲۱^{j}	۰/۵۱۷	۰/۲۹۹^{efg}	۹/۳۴^{abcd}	۱۵/۱۴^{h}
$a_1b_1c_4$	۱/۷۵^{kl}	۰/۵۵۷	۰/۳۳۴^{def}	۸/۹۷^{bcdef}	۲۳/۶۲^{g}
$a_1b_1c_5$	۱/۰۶^{n}	۰/۵۷۹	۰/۵۱۶^{b}	۸/۶۰^{bcdef}	۲۷/۳۲^{f}
$a_1b_2c_1$	۵/۴۶^{e}	۰/۳۴۸	۰/۱۹۳^{ijk}	۱۱/۰۷^{a}	۶/۷۴^{l}
$a_1b_2c_2$	۲/۱۳^{j}	۰/۴۶۲	۰/۳۶۳^{cd}	۹/۸۲^{abc}	۸/۶۴^{j}
$a_1b_2c_3$	۱/۶۳^{lm}	۰/۵۱۷	۰/۴۰۵^{c}	۸/۸۷^{bcdef}	۲۳/۷^{g}
$a_1b_2c_4$	۱/۰۲^{n}	۰/۵۵۷	۰/۵۷۴^{b}	۸/۸۹^{bcdef}	۳۳/۲۳^{e}
$a_1b_2c_5$	۰/۷۲^{o}	۰/۵۷۹	۰/۷۵۹^{a}	۷/۷۱^{def}	۳۴/۷۴^{d}
$a_2b_1c_1$	۱۹/۰۰^{a}	۰/۰۳۶	۰/۱۷۵^{jk}	۱۰/۹۴^{a}	۶/۲۴^{l}
$a_2b_1c_2$	۷/۳۸^{d}	۰/۲۰۵	۰/۲۱۵^{hij}	۹/۷^{abc}	۱۰/۶۸^{i}
$a_2b_1c_3$	۴/۹۶^{f}	۰/۲۸۶	۰/۲۵۲^{ghi}	۸/۳۶^{cdef}	۳۲/۲۷^{e}
$a_2b_1c_4$	۳/۸۸^{g}	۰/۳۴۶	۰/۲۷۴^{fgh}	۷/۹۳^{cdef}	۴۲/۶۸^{bc}
$a_2b_1c_5$	۲/۵۰^{i}	۰/۳۷۸	۰/۳۸۹^{cd}	۷/۳۲^{ef}	۴۳/۲۴^{b}
$a_2b_2c_1$	۱۲/۱۷^{b}	۰/۰۳۶	۰/۲۷۳^{fgh}	۱۱/۰۵^{a}	۶/۸۸^{kl}
$a_2b_2c_2$	۵/۵۴^{e}	۰/۲۰۵	۰/۲۸۶^{fg}	۹/۲۶^{abcde}	۲۳/۲۹^{g}
$a_2b_2c_3$	۳/۵۰^{h}	۰/۲۸۶	۰/۳۵۸^{cde}	۷/۵۳^{def}	۴۱/۹۹^{c}
$a_2b_2c_4$	۱/۹۶^{jk}	۰/۳۴۶	۰/۵۴۱^{b}	۷/۹۱^{cdef}	۵۴/۱۹^{a}
$a_2b_2c_5$	۱/۳۸^{m}	۰/۳۷۸	۰/۷۰۵^{a}	۷/۰۵^{f}	۵۴/۷۶^{a}

a_1= ٪۱۴ b_1= ۰/۵m/s c_1= ۳۰°C c_3= ۵۰°C c_5= ۷۰°C

a_2=٪۱۰/۵ b_2= ۲m/s c_2=۴۰°C c_4=۶۰°C

کاهش معنی‌دار زمان خشک شدن محصول در همهٔ موارد شده است. در ارتباط با تأثیر رطوبت نهایی نیز جدول مذکور نشان می‌دهد که در وضعیتی که سایر شرایط ثابت باشد کاهش آن از سطح ۱۴٪ به ۱۰/۵٪ باعث افزایش معنی‌دار زمان می‌شود.

شاخص دیگر کسر رطوبتی (MR) است که در جدول ۱ مقادیر مربوط به آن در شرایط اعمال تیمارهای مختلف موجود است. مشاهده می‌شود که از میان ۳ عامل مورد استفاده در تیمارها، فاکتورهای درجه حرارت هوا و رطوبت نهایی بر MR مؤثر هستند. به این صورت که افزایش دما (در حالی که سایر فاکتورها ثابت باشند) سبب کاهش رطوبت نسبی محیط و در نتیجه کاهش رطوبت تعادلی (M_e) محصول می‌شود و با کاهش رطوبت تعادلی مقدار کسر رطوبتی افزایش می‌یابد.

پس از تجزیه واریانس مشخص شد که اثر تیمارها بر ثابت K (شاخص مهم سینتیک کاهش رطوبت در محصول) در سطح ۱٪ معنی‌دار است و مطابق با جدول ۱، تحت تأثیر هر ۳ فاکتور اعمال شده در تیمارها قرار می‌گیرد. به طوری که افزایش دما و

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]

یا افزایش سرعت جریان هوا هر یک به تنهایی و در وضعیتی که سایر شرایط ثابت باشد منجر به افزایش مقدار ثابت سرعت خشک شدن می‌شود به عنوان مثال افزایش درجه حرارت از ۴۰°C (معادل با رطوبت نسبی ۲۵/۸٪) در تیمار $a_1b_1c_2$ به درجه حرارت ۵۰ °C (معادل با رطوبت نسبی ۱۵/۷٪) در تیمار $a_1b_1c_3$ سبب افزایش K از ۰/۲۰۶(1/hr) به ۰/۲۹۹(1/hr) شده و یا افزایش سرعت جریان هوا از ۵/ ۰متر بر ثانیه در تیمار $a_1b_1c_2$ به ۲ متر بر ثانیه در تیمار $a_1b_2c_2$ باعث افزایش مقدار K از ۰/۲۰۶(1/hr) به ۰/۳۶۳(1/hr) شده است که هر دو در سطح ۱٪ معنی‌دار هستند.

کاهش رطوبت نهایی محصول نیز بر مقدار K مؤثر است (سایر شرایط ثابت)، ولی چنانچه در جدول ۱ مشاهده می‌شود کاهش رطوبت نهایی تأثیر مشخصی بر روند تغییرات K ندارد به عنوان مثال کاهش رطوبت نهایی از ۱۴٪ در تیمار $a_1b_1c_1$ به ۱۰/۵٪ در تیمار $a_2b_1c_1$ باعث افزایش مقدار K از ۰/۱۳۵(1/hr) به ۰/۱۷۵(1/hr) شده است (که البته در سطح ۱٪ آماری معنی‌دار نمی‌باشد) در حالی که کاهش رطوبت نهایی از ۱۴٪ در تیمار $a_1b_2c_2$ به ۱۰/۵٪ در تیمار $a_2b_2c_2$ سبب کاهش این ثابت از ۰/۳۶۳(1/hr) به ۰/۲۸۶(1/hr) شده که در سطح ۱٪ معنی‌دار است.

ب) هم‌بستگی زمان و ثابت سرعت خشک شدن با شاخص‌های کیفی محصول

پس از تجزیه واریانس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، مشخص شد تیمارهای به کار رفته بر ضایعات (درصد شکستگی) و مقاومت خمشی محصول، دارای اثر معنی‌دار می‌باشند. مقایسهٔ میانگین‌های به دست آمده از آزمون دانکن در جدول ۱ ارائه شده است. اعداد نشان می‌دهند که افزایش دما، افزایش سرعت جریان هوا و کاهش رطوبت نهایی محصول باعث کاهش مقدار عددی این دو صفت می‌شوند. ولی به منظور صرفه‌جویی در زمان خشک شدن ، می‌توان به جای افزایش دما از سرعت بیشتر جریان هوا استفاده کرد و یا این که از کاهش زیاده از حد رطوبت جلوگیری کرد تا تأثیر نامطلوب کمتر بر کیفیت تبدیل محصول داشته باشد (۶ و۲۲).

هم‌بستگی زمان و ثابت سرعت افت رطوبت با دو خصوصیت مذکور با استفاده از روش پیرسون به دست آمد (۱ و ۶).

در صورتی که رطوبت محصول از ۲۰/۵٪ به ۱۴٪ کاهش یابد، ضرایب هم‌بستگی میان زمان و ضایعات (درصد شکستگی)، زمان و مقاومت خمشی، ثابت K و ضایعات و میان ثابت K و مقاومت خمشی به ترتیب زیر به‌دست آمدند: ۰/۸- ، ۰/۹۱+ ، ۰/۹۱+ و ۰/۹۱- . مشاهده می‌شود که هم‌بستگی زمان با ضایعات (درصد شکستگی) منفی و با مقاومت خمشی محصول مثبت می‌باشد. هم‌چنین ارتباط میان زمان کاهش رطوبت و ثابت K با شاخص‌های کیفی مذکور در دامنهٔ ۲۰/۵٪ الی ۱۴٪ برازش شده است که نتایج آن در شکل‌های ۵ الی ۸ ارائه شده‌اند.

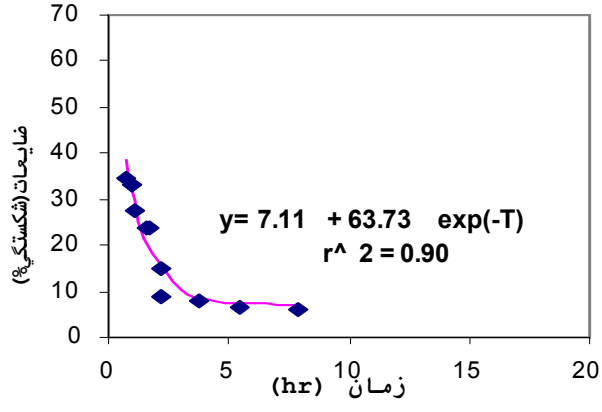
بنابراین با توجه به مقادیر بالای ضرایب تبیین ($\mathbf{r^2}$) به‌دست آمده در این دامنهٔ رطوبتی، برآورد نسبتاً دقیقی از دو ویژگی کیفی مذکور امکان‌پذیر است.

در وضعیتی که رطوبت محصول از ۲۰/۵٪ به ۱۰/۵٪ کاهش یافت ضرایب هم‌بستگی میان زمان و ضایعات، زمان و مقاومت خمشی، ثابت K و ضایعات و میان ثابت K و مقاومت خمشی به ترتیب عبارت‌اند از: ۰/۸۶- ، ۰/۹۱+ ، ۸۰/+ و ۰/۶۸- . بنابراین در این محدودهٔ رطوبتی نیز هم‌بستگی زمان با ضایعات (درصد شکستگی) و مقاومت خمشی به ترتیب منفی و مثبت و هم‌بستگی ثابت K با ضایعات و مقاومت خمشی به ترتیب مثبت و منفی می‌باشد. معادلات حاصل از برازش این دو ویژگی بر حسب زمان و ثابت سرعت افت رطوبت (K) در دامنهٔ ۲۰/۵٪ تا ۱۰/۵٪ در شکل‌های ۹ الی ۱۲ ارائه شده است.

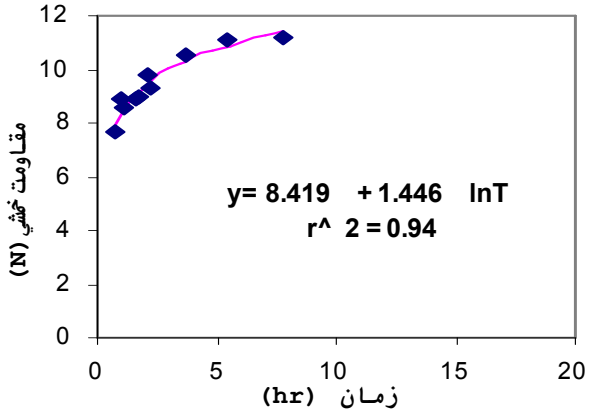
در این نمودارها دیده می‌شود، برآورد ضایعات (درصد شکستگی) و مقاومت خمشی با استفاده از زمان (با توجه به بالا بودن ضرایب تبیین) امکان‌پذیر است ولی با استفاده از ثابت K (به دلیل پایین بودن ضرایب تبیین) دارای خطای بالا می‌باشد.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

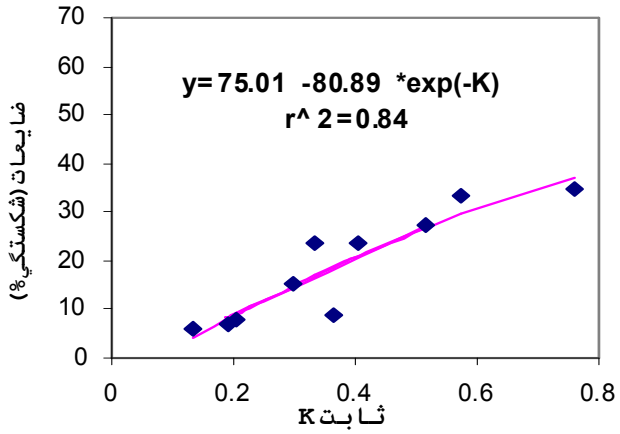
[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]



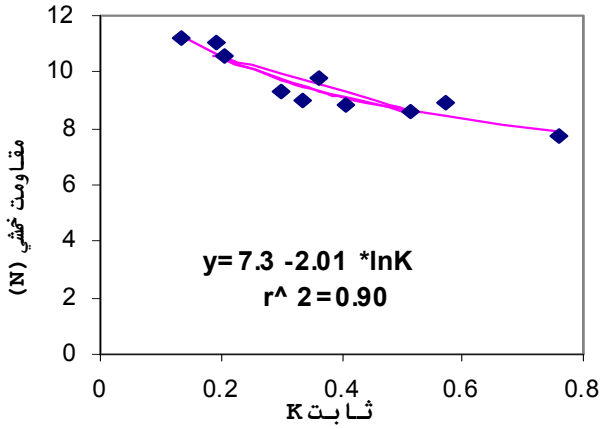
شکل ۵. ارتباط ضایعات تبدیل با زمان کاهش رطوبت در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۴٪



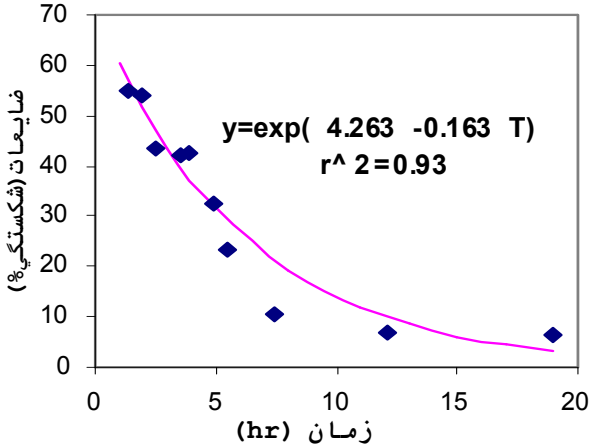
شکل ۶. ارتباط مقاومت خمشی با زمان کاهش رطوبت در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۴٪



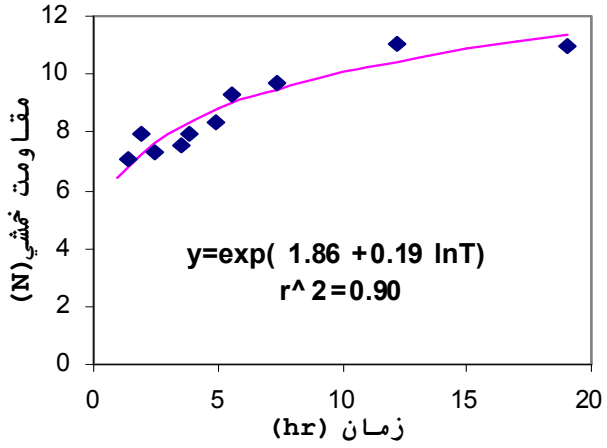
شکل ۷. ارتباط ضایعات تبدیل با ثابت K در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۴٪



شکل ۸ . ارتباط مقاومت خمشی با ثابت K در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۴٪



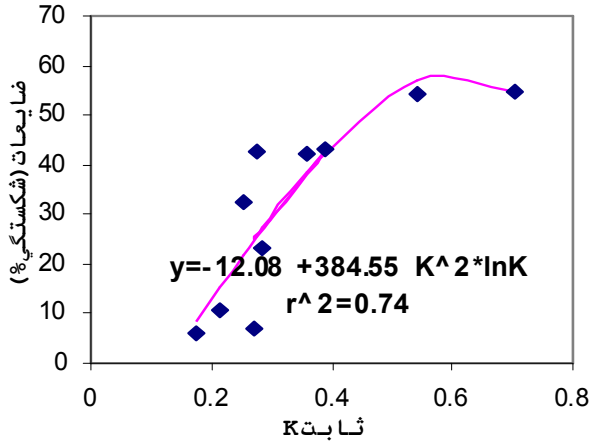
شکل ۹. ارتباط ضایعات تبدیل با زمان کاهش رطوبت در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۰/۵٪



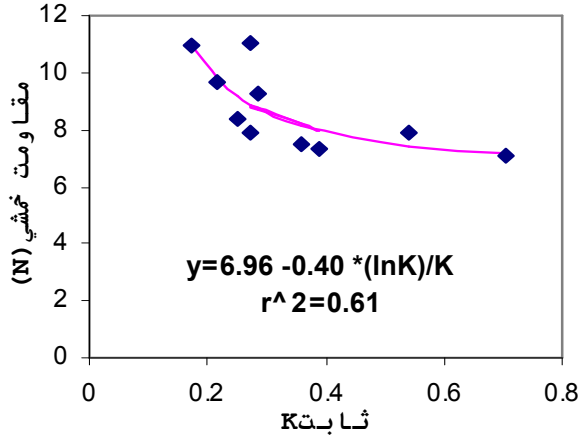
شکل ۱۰. ارتباط مقاومت خمشی با زمان کاهش در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۰/۵٪

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]



شکل ۱۱. ارتباط ضایعات تبدیل با ثابت K در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۰/۵٪



شکل ۱۲. ارتباط مقاومت خمشی با ثابت K در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۰/۵٪

بحث

نتایج مربوط به منحنی‌های رطوبتی نشان داد که با گذشت زمان و نزدیک شدن فرایند خشک شدن به انتها، از شیب هر منحنی و در نتیجه سرعت افت رطوبت کاسته می‌شود که علت این مسأله کاهش فشار بخار در محصول و نزدیک شدن آن به فشار بخار در محیط می‌باشد (۱۸ و ۲۲).

در ارتباط با عامل درجه حرارت، همان گونه که منحنی‌ها و نتایج نشان دادند افزایش آن منجر به افزایش ثابت K و کاهش زمان افت رطوبت می‌شود. این مطلب را چنین می‌توان توجیه کرد که افزایش درجه حرارت هوا در خشک کن باعث کاهش رطوبت نسبی آن و بالعکس باعث افزایش فشار بخار در محصول می‌گردد. در نتیجه با افزایش اختلاف فشار بخار میان محصول و محیط اطراف، سرعت انتقال جرم (رطوبت) از دانه به محیط افزایش پیدا می‌کند (۵ و۲۲).

سرعت جریان هوا از عواملی است که به کمک آن می‌توان ضریب انتقال جرم و ضریب انتقال حرارت را توسط آن تغییر داد. بدین ترتیب که با افزایش این فاکتور، ضرایب فوق افزایش می‌یابد و در نتیجه انتقال جرم از محصول به هوای اطراف آن در واحد زمان شدت می‌یابد که خود منجر به کاهش زمان خشک شدن و افزایش ثابت K می‌شود (۴ و ۲۱).

آزمون هم‌بستگی نشان داد که در دامنهٔ رطوبتی مشخص طی فرایند خشک شدن، ضایعات ناشی از خردشدن محصول به ترتیب با ثابت K رابطهٔ مستقیم و با زمان افت رطوبت رابطهٔ معکوس دارد. به عبارتی افزایش سرعت خشک شدن و یا کاهش زمان طی دامنهٔ رطوبتی مشخص، منجر به افزایش درصد شکستگی می‌گردد. لنز و کانز تحقیقات مشابهی در سال ۱۹۹۶ انجام دادند و به نتایج مشابهی رسیدند (۱۴).

هم‌چنین نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که هم‌بستگی مقاومت خمشی محصول با زمان و ثابتK به ترتیب مثبت و منفی می‌باشد، به عبارتی افزایش زمان و یا کاهش سرعت افت رطوبت منجر به افزایش مقاومت خمشی محصول می‌شود. در نتیجه جهت تغییرات این دو ویژگی کیفی خلاف یکدیگر است و با یکدیگر رابطهٔ معکوس دارند.

مطالعاتی که کانز و چادهری در سال ۱۹۷۲ انجام دادند نشان دهنده این نتایج است. آنان طی مطالعهٔ خود به این نتیجه رسیدند که چنانچه پدیدهٔ دفع رطوبت از دانه با سرعت انجام گیرد تراکم تنش‌ها در دانه افزایش یافته که خود باعث ترک خوردگی و کاهش مقاومت بافت آن در مقابل نیروهای خارجی می‌شود (۱۲).

مطالعهٔ پتی و همکاران در سال ۱۹۹۴ تأییدی بر رابطهٔ معکوس میان تغییرات زمان و ضایعات ناشی از خردشدن

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]

محصول می‌باشد. آنان در تحقیق خود با افزایش ظرفیت تبخیر هوا و به تبع آن کاهش زمان فرایند خشک شدن، افزایش معنی‌داری در شکنندگی و ضایعات مشاهده نمودند (۱۹).

نتایج به دست آمده از این بررسی با نتایج مربوط به پژوهش چن و همکاران در سال ۱۹۹۷ منطبق است. آنان پس از بررسی ارتباط میان ثابت K و ضایعات تبدیل دریافتند که دارای هم‌بستگی منفی معنی‌دار با یکدیگر هستند و با کاهش مقدار K می‌توان از افزایش ضایعات تبدیل ممانعت کرد (۶).

نتیجه‌گیری

الف) رطوبت نهایی ۱۴٪ (نسبت به رطوبت نهایی ۱۰/۵٪) نه تنها موجب صرفه‌جویی قابل توجه در زمان فرایند خشک‌شدن می‌شود، بلکه از افزایش ضایعات در مرحلهٔ تبدیل نیز جلوگیری می‌کند.

ب) با توجه به نتایج به دست آمده در آزمایش‌ها، در رطوبت نهایی ۱۴٪، بهترین ترکیب دما و سرعت جریان هوا در خشک‌کن به منظور کاهش زمان خشک شدن و هم‌چنین کاهش ضایعات در مرحلهٔ تبدیل، دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه می‌باشد که زمان ۲/۱۳ ساعت و درصد شکستگی ۸/۶۴٪ را به خود اختصاص داده است.

ج) برآورد ضایعات ناشی از شکستگی محصول در مرحلهٔ تبدیل، با استفاده از زمان و یا ثابت سرعت خشک‌شدن (K) امکان‌پذیر است که البته این برآورد، با استفاده از پارامتر زمان خشک‌شدن از خطای کمتر برخوردار می‌باشد.

منابع مورد استفاده

۱. ارقامی، ن. و ا. بزرگ‌نیا. ۱۳۷۰. *آمار چند متغیره کاربردی*. (تألیف کارتر سریواستاوا). چاپ اول، آستان قدس رضوی، مشهد.

۲. بی‌نام. ۱۳۷۶. *برنج در آئینه آمار*. انتشارات اداره کل آمار و اطلاعات وزارت کشاورزی، بلوار کشاورز، تهران.

3. Anonymous, 2000. ASAE Standards. S 352.2 DEC 92: Moisture measurement –unground grain and seeds. 47th ed., Joseph. MI., USA.
4. Bala, B. K. and J. H. Woods. 1992. Thin layer drying models for malt. J. Food Eng. 16: 239-49.
5. Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema and C. W. Hall. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. The AVI Pub. Company, USA.
6. Chen, H., T. J. Siebenmorgen and B. P. Marks. 1997. Relating drying rate constant to head rice yield reduction of long-grain rice. Trans. ASAE 40: 1133-39.
7. Cnossen, A. G. and T. J. Siebenmorgen. 2000. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on milling quality. Trans. ASAE 43(6): 1661-67.
8. Courtois, F., M. Abud Archila, C. Bonazzi, J. M. Meot and G. Trystram. 2001. Modelling and control of a mixed-flow rice dryer with emphasis on breakage quality. J. Food Eng. 49(4): 303-309.
9. Goodman, D. E. and R. M. Rao. 1985. Effect of grain type and milled rice kernel hardness on the head rice yields. J. Food Sci. 50: 840-42.
10. Jindal.V. K. and T. J. Siebenmorgen. 1987. Effects of oven drying temperature and drying time on rough rice moisture content determination. Trans. ASAE 30(4): 1185-92.
11. Kunze, O. R. 1979. Fissuring of the rice grain after heated air drying. Trans. ASAE 22: 1197-207.
12. Kunze, O. R. and M. Choudhury. 1972. Moisture adsorption related to the tensile strength of rice. Cereal Chem. 49: 684-96.
13. Kunze, O. R. and S. Prasad. 1978. Grain fissuring potentials in harvesting and drying of rice. Trans. ASAE 21: 361-66.
14. Lan,Y. and O. R. Kunze. 1996. Relative humidity effects on the development of fissures in rice. Cereal Chem. 73: 222-24.
15. Lue, R. and T. J. Siebenmorgen. 1995. Correlation of head rice yield to selected physical and mechanical properties of rice kernels. Trans. ASAE 38: 889-94.
16. Mohsenin, N. N. 1989. Physical Properties of Plants and Animal Materials. 2nd ed., USA.
17. Montgomery, D. C. 1991. Design and Analysis of Experiments. 3rd ed., USA.
18. Peplinski, A. J., J. W. Paulis, J. A. Bietz and R. C. Pratt. 1994. Drying of high moisture corn: Changes in properties and physical quality. Cereal Chem. 71: 129-33.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]

19. Peuty, M. A., A. Themelin, J. F. Cruz, G. Arnand and J. P. Fohr. 1994. Improvement of Paddy Quality by Optimization of Drying Conditions. pp.929-35. *In* : V. Rudolph and P. B. Keey (Eds.), Montpellier, France.
20. Sahay, K. M. and K. K. Singh. 1994. Unit Operations of Agricultural Processing. First ed., Vikas Publishing House PVT Ltd., New Delhi.
21. Singh, R. P. and D. R. Heldman. 1993. Introduction to Food Engineering. 2nd ed., Academic press, San. Diego, CA. USA.
22. Teter, N. 1987. Paddy Drying Manual. FAO of the U. N., Rome.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.1.16.1]