

بررسی ارتباط زمان و ثابت سرعت خشک شدن (K) با پارامترهای خشک کن و ضایعات (درصد شکستگی) برنج در مرحله 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 مرحله تبدیل به برنج سفید و در نتیجه ارزش اقتصادی آن، نحوه اعمال فرایند خشک کردن و کنترل پارامترها در خشک کن 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 خشک کن (در پنج سطح: ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد)، سرعت جریان هوای خشک کن (در دو سطح ۰/۵ و ۲ متر بر ثانیه) و رطوبت شلتوك 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 خشک کن باعث کاهش زمان و بر عکس 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 دامنه رطوبتی مشخص (۲۰/۵٪ الی ۱۴٪ و یا ۲۰/۵٪ الی ۲۰/٪) میزان ضایعات (درصد شکستگی) برنج در مرحله تبدیل با زمان خشک شدن همبستگی منفی و با ثابت K همبستگی مثبت دارد در حالی که این دو شاخص با مقاومت خمی محصول به ترتیب همبستگی مثبت و منفی دارند. برآژش خصوصیات کیفی شامل ضایعات در مرحله تبدیل و مقاومت خمی محصول بر حسب 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 خشک کردن، شلتوك، تبدیل، سیستمیک خشک شدن، کیفیت

مقدمه

بودن رطوبت نسبی هوای روش‌های طبیعی دارای کارایی پایین هستند) بیشتر کاربرد دارد، استفاده از خشک کن‌های مکانیکی است. در این خشک کن‌ها با استفاده از جابه‌جایی

از جمله روش‌هایی که برای کاهش رطوبت برنج قابل استفاده می‌باشد و به خصوص در مناطق با رطوبت بالا (به علت بالا

۱. عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی، دزفول

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

ایجاد پدیده نامطلوب ترک خوردگی 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 پایه 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 مرحله تبدیل می‌باشد که البته می‌توان تا حدودی با کاهش ظرفیت تبخیر هوای خشک‌کن از اثر نامطلوب آن کاست (۸).

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 مرحله تبدیل شلتوك به برنج سفید و در نتیجه کاهش ارزش اقتصادی محصول می‌شود زیرا در مرحله پوستگیری و سفید کردن، نیروهای خمی و سایشی به محصول وارد می‌شوند و برای سالم ماندن و ممانعت از خرد شدن شلتوك، لازم است که از مقاومت خمی و کششی لازم برخوردار باشد تا ضایعات به حداقل برسد (۵ و ۲۰).

اگرچه افزایش ظرفیت خشک‌کن از طریق افزایش سرعت خشک‌شدن 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 نتیجه دفع رطوبت در آن ایجاد می‌گردد. کائز و چاده‌های 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 مرحله خشک‌شدن، سلول‌های خارجی دانه با از دست دادن رطوبت، کاهش حجم داده و چروکیله 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 خمی 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

گیلان است، استفاده شد (۲ و ۹). محصول در کیسه پلی اتیلن به آزمایشگاه انتقال یافت و در دمای 5°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 اولیه آن با استفاده از اتو در دمای 130°C تا رسیدن به وزن ثابت (۱۶ ساعت) تعیین شد که معادل ۲۰٪ 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 جريان هوای خشککن (در دو سطح: ۰/۵ و ۲ متر بر ثانية) و رطوبت نهایی محصول (در دو سطح: ۱۴ و ۱۰٪ درصد 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 به طور همزمان در ۴ دستگاه خشککن (هر یک مجهز به دمنده سانتریفوژی و توان تولید جريان هوای تا سرعت ۲ متر بر ثانية و سیستم کنترل دما با دقت $\pm 1^{\circ}\text{C}$) اعمال گردید. وزن نمونه در هر تکرار حدود ۲۵۰ گرم با عمق بستر ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تغییرات میزان رطوبت برای هر تکرار بر اساس توزین وزن به فاصله زمانی ۱۰ دقیقه و موازنۀ جرم ماده خشک صورت می‌گرفت تا این که در نهایت رطوبت نمونه به مقدار مورد نظر برسد. پس از این مرحله، هر نمونه به طور جداگانه داخل کیسه‌های پلی اتیلنی 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 معادله 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 P_v/P_s رطوبت نسبی محیط به اعشار می‌باشد. E ، F و C

لیو و سینمیرگن در سال ۱۹۹۵ جهت جایگزین نمودن روشنی مناسب به جای روش مستقیم تبدیل شلتوك به برنج سفید و تعیین کیفیت تبدیل، دو روش را مورد بررسی قرار دادند. آنان آزمون خمثی (Bending test) و نیز آزمون فشاری را به وسیله دستگاه اینستران (Instron) روی ۳ شکل برنج یعنی شلتوك، برنج قهوه‌ای و برنج سفید مربوط به دو رقم مورد مطالعه قرار دادند. آنان همبستگی کیفیت تبدیل (که با شکنندگی رابطه 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 خمثی در لحظه شکستن نمونه برای برنج قهوه‌ای و شلتوك همبستگی خوبی با کیفیت تبدیل دارد (۱۵).

در سال ۱۹۹۷ چن و همکاران تحقیقی در مورد تأثیر پارامترهای خشککن بر مقدار K (ثبت 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 خمثی و ضایعات (میزان شکستگی) در مرحله تبدیل، (ج) ارائه مدل برای برآورد ضایعات و مقاومت خمثی 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

نتایج

الف) تغییرات زمان و ثابت سرعت خشک شدن در ارتباط با پارامترهای خشک کن

منحنی های رطوبتی حاصل از تیمارهای اعمال شده در شکل های ۱ الی ۴ ارائه شده است. آنچه در این نمودارها به وضوح قابل مشاهده می باشد، این است که در هر نمودار، افزایش درجه حرارت هوای خشک کن منجر به افزایش شبیب یا کاهش طول منحنی و در نتیجه کاهش زمان لازم برای از دست دادن رطوبت می شود. نکته دیگر این که در دمای ثابت و رطوبت نهایی یکسان، افزایش سرعت جريان هوا در خشک کن از ۰/۵ به ۲ متر بر ثانیه باعث مقداری افزایش در شبیب منحنی و در نتیجه کوتاه شدن منحنی و کاهش زمان می شود. در ارتباط با کاهش رطوبت نهایی از ۱۴٪ به ۱۰/۵٪ در وضعیتی که پارامترهای سرعت جريان هوا و درجه حرارت ثابت هستند مشاهده می کنیم که شبیب منحنی ثابت می ماند و طولانی تر شدن منحنی مربوط به افزایش زمان لازم برای کاهش بیشتر رطوبت تا ۱۰/۵٪ می باشد.

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٪ معنی دار است. میانگین مقادیر مربوط به زمان خشک شدن محصول، کسر رطوبتی و ثابت K و مقایسه حاصل از آنها با استفاده از آزمون دانکن در جدول ۱ ارائه شده است (۱۷).

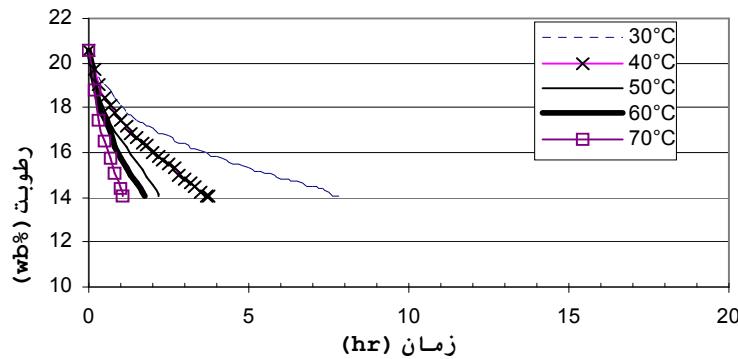
این جدول بیانگر این مطلب است که زمان کاهش رطوبت محصول تابعی از هر ۳ عامل رطوبت نهایی محصول، سرعت جريان و درجه حرارت هوای خشک کن می باشد. به طوری که در این جدول دیده می شود در سطوح یکسان سرعت جريان هوا و رطوبت نهایی، افزایش دما در دامنه ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتی گراد در تمام سطوح منجر به کاهش معنی دار زمان خشک شدن شده است. همچنین در تیمارهایی که رطوبت نهایی و درجه حرارت یکسان است، افزایش سرعت جريان هوا باعث

ضرایب ثابت هستند (۵). کاربرد رطوبت تعادلی برای تعیین کسر رطوبتی یعنی $(M - M_e)/(M_e - M_0)$ می باشد که در این رابطه M رطوبت نهایی، M_e رطوبت اولیه و M_0 رطوبت تعادلی محصول بر پایه خشک می باشند. در نهایت مقدار K از رابطه $MR = \exp(-K\theta)$ محاسبه شد که θ زمان لازم برای افت رطوبت محصول و ثابت K در واقع ضریب زاویه منحنی تغییرات لگاریتم کسر رطوبتی (MR) بر حسب زمان است.

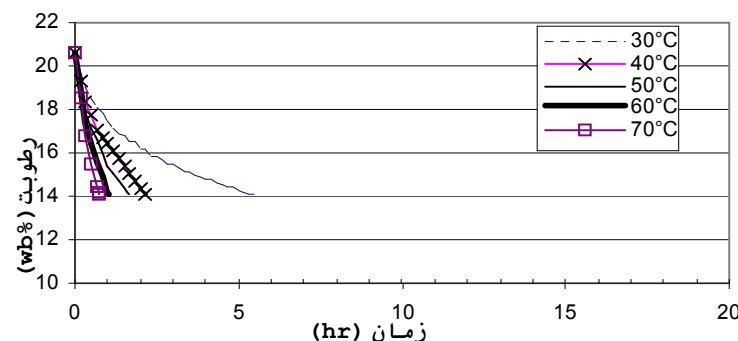
پس از این مرحله، آزمایش های مربوط به تعیین مقاومت خمشی و تعیین ضایعات در مرحله تبدیل به برنج سفید صورت گرفت. برای تعیین مقاومت خمشی از دستگاه اینستران مدل ۱۱۴۰ ساخت انگلیس استفاده شد. بدین منظور دو سر دانه شلتوك برنج روی دو تکیه گاه قرار می گرفت و تیغه (Probe) متصل به سنسور دستگاه که به ثبت کننده (Recorder) متصل بود با سرعت ۳۰ میلی متر در دقیقه به سمت پایین حرکت داده می شد تا در وسط دانه میان دو تکیه گاه، نیرو را وارد کند (۱۵ و ۱۶). نیروی وارد شده توسط ثبت کننده، روی کاغذ مخصوص ثبت می شد و در نقطه شکستن دانه به پیک خود می رسید که معادل با مقاومت خمشی شکست آن بود.

به منظور تعیین میزان ضایعات (درصد شکستگی) در مرحله تبدیل، از هر نمونه ابتدا ۱۵۰ گرم شلتوك به دستگاه پوست کن غلتک لاستیکی (ساخت کمپانی ساتاکه ژاپن با متوسط پوست گیری ۹۸/۵ در رطوبت ۱۰/۵٪ و ۹۷/۸ در رطوبت ۱۴٪) و برنج قهوه ای به دست آمده به دستگاه سفید کن سایشی (ساخت کمپانی ساتاکه ژاپن) انتقال یافت. عمل پولیش زنی هر نمونه در دستگاه سفید کن به مدت ۳ دقیقه انجام گرفت و پس از این مرحله نسبت وزنی دانه های با طول کمتر از سه چهارم طول دانه کامل به شلتوك اولیه مشخص شد و برای بیان ضایعات (میزان شکستگی) به صورت درصد محاسبه گردید (۲۰ و ۲۱٪).

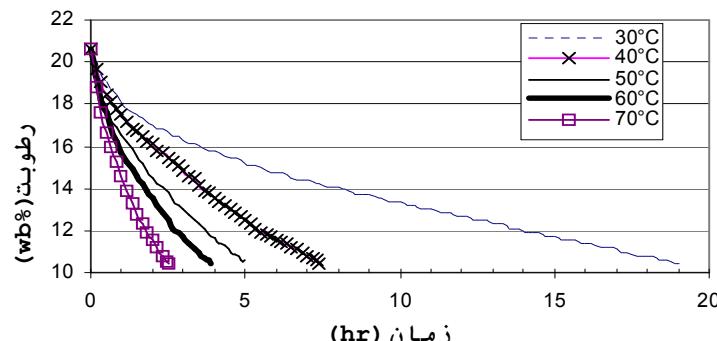
محاسبات آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزارهای SAS و Excel انجام گرفت.



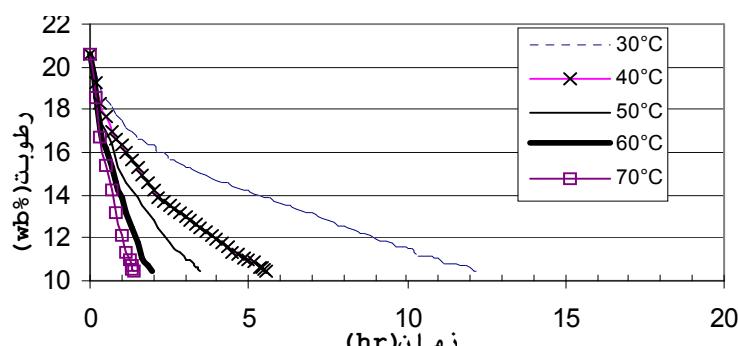
شکل ۱. منحنی های رطوبتی در دماهای مختلف و سرعت جریان ۰/۵ متر بر ثانیه (رطوبت نهایی ۱۴٪)



شکل ۲. منحنی های رطوبتی در دماهای مختلف و سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه (رطوبت نهایی ۱۴٪)



شکل ۳. منحنی های رطوبتی در دماهای مختلف و سرعت جریان ۰/۵ متر بر ثانیه (رطوبت نهایی ۵٪)



شکل ۴. منحنی های رطوبتی در دماهای مختلف و سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه (رطوبت نهایی ۵٪)

جدول ۱. مقایسه میانگین زمان خشک شدن، ثابت K، مقاومت خمثی و ضایعات (درصد شکستگی) در تیمارهای خشک شدن

تیمار	زمان (hr)	کسر رطوبتی (MR)	ثابت K (1/hr)	مقاومت خمثی (N)	ضایعات (شکستگی) (%)
a ₁ b ₁ c ₁	۷/۸۲ ^c	۰/۳۴۸	۰/۱۳۵ ^k	۱۱/۱۸ ^a	۶/۰۴ ⁱ
a ₁ b ₁ c ₂	۳/۷۵ ^{gh}	۰/۴۶۲	۰/۲۰۶ ^{ij}	۱۰/۰۴ ^{ab}	۷/۹۳ ^k
a ₁ b ₁ c ₃	۲/۲۱ ^j	۰/۵۱۷	۰/۲۹۹ ^{efg}	۹/۳۴ ^{abcd}	۱۵/۱۴ ^h
a ₁ b ₁ c ₄	۱/۷۵ ^{kl}	۰/۰۵۷	۰/۳۳۴ ^{def}	۸/۹۷ ^{bcd ef}	۲۳/۶۲ ^g
a ₁ b ₁ c ₅	۱/۰۶ ⁿ	۰/۰۷۹	۰/۰۱۶ ^b	۸/۶۰ ^{bcd ef}	۲۷/۳۲ ^f
a ₁ b ₂ c ₁	۵/۴۶ ^e	۰/۳۴۸	۰/۱۹۳ ^{ijk}	۱۱/۰۷ ^a	۶/۷۴ ⁱ
a ₁ b ₂ c ₂	۲/۱۳ ^j	۰/۴۶۲	۰/۳۶۳ ^{cd}	۹/۸۲ ^{abc}	۸/۶۴ ^j
a ₁ b ₂ c ₃	۱/۶۳ ^{lm}	۰/۰۱۷	۰/۰۴۰ ^c	۸/۸۷ ^{bcd ef}	۲۳/۷۷ ^g
a ₁ b ₂ c ₄	۱/۰۲ ⁿ	۰/۰۵۷	۰/۰۷۴ ^b	۸/۸۹ ^{bcd ef}	۳۳/۲۳ ^e
a ₁ b ₂ c ₅	۰/۷۲ ^o	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹ ^a	۷/۷۱ ^{def}	۳۴/۷۴ ^d
a ₂ b ₁ c ₁	۱۹/۰۰ ^a	۰/۰۳۶	۰/۱۷۵ ^{jk}	۱۰/۹۴ ^a	۶/۲۴ ⁱ
a ₂ b ₁ c ₂	۷/۳۸ ^d	۰/۲۰۵	۰/۲۱۵ ^{hij}	۹/۷ ^{abc}	۱۰/۶۸ ⁱ
a ₂ b ₁ c ₃	۴/۹۶ ^f	۰/۲۸۶	۰/۲۵۲ ^{ghi}	۸/۳۶ ^{cdef}	۳۲/۲۷ ^e
a ₂ b ₁ c ₄	۳/۸۸ ^g	۰/۳۴۶	۰/۲۷۴ ^{fgh}	۷/۹۳ ^{cdef}	۴۲/۶۸ ^{bc}
a ₂ b ₁ c ₅	۲/۵۰ ⁱ	۰/۳۷۸	۰/۳۸۹ ^{cd}	۷/۳۲ ^{ef}	۴۳/۲۴ ^b
a ₂ b ₂ c ₁	۱۲/۱۷ ^b	۰/۰۳۶	۰/۲۷۳ ^{fgh}	۱۱/۰۵ ^a	۶/۸۸ ^{kl}
a ₂ b ₂ c ₂	۵/۰۴ ^e	۰/۲۰۵	۰/۲۸۶ ^{fg}	۹/۲۶ ^{abcde}	۲۳/۲۹ ^g
a ₂ b ₂ c ₃	۳/۵۰ ^h	۰/۲۸۶	۰/۳۵۸ ^{cde}	۷/۵۳ ^{def}	۴۱/۹۹ ^c
a ₂ b ₂ c ₄	۱/۹۶ ^{jk}	۰/۳۴۶	۰/۰۴۱ ^b	۷/۹۱ ^{cdef}	۵۴/۱۹ ^a
a ₂ b ₂ c ₅	۱/۳۸ ^m	۰/۳۷۸	۰/۰۷۰ ^a	۷/۰۵ ^f	۵۴/۷۶ ^a

$$\begin{array}{lllll} a_1 = ۷/۱۴ & b_1 = ۰/۰m/s & c_1 = ۳۰^{\circ}\text{C} & c_3 = ۵۰^{\circ}\text{C} & c_5 = ۷۰^{\circ}\text{C} \\ a_2 = ۷/۱۰/۵ & b_2 = ۷m/s & c_2 = ۴۰^{\circ}\text{C} & c_4 = ۶۰^{\circ}\text{C} & \end{array}$$

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 سیتیک کاهش رطوبت در محصول) در سطح ۱٪ معنی دارد و مطابق با جدول ۱، تحت تأثیر هر ۳ فاکتور اعمال شده در تیمارها قرار می‌گیرد. به طوری که افزایش دما و

کاهش معنی دار زمان خشک شدن محصول در همه 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 معنی دار 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

از کاهش زیاده از حد رطوبت جلوگیری کرد تا تأثیر نامطلوب کمتر بر کیفیت تبدیل محصول داشته باشد (۶ و ۲۲).

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

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

بنابراین با توجه به مقادیر بالای ضرایب تبیین (r^2) به دست آمده در این دامنه رطوبتی، برآورد نسبتاً دققی از دو ویژگی کیفی مذکور امکان‌پذیر است.

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

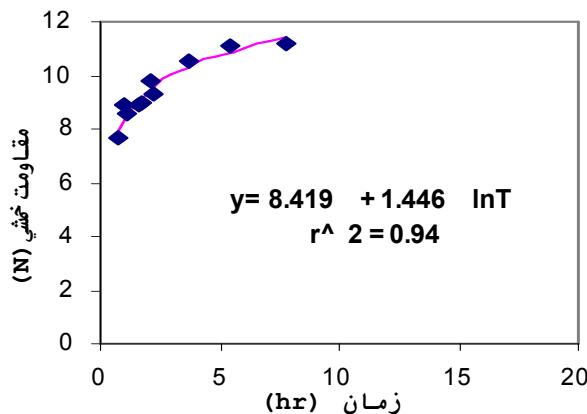
در این نمودارها دیده می‌شود، برآورد ضایعات (درصد شکستگی) و مقاومت خمی با استفاده از زمان (با توجه به بالا بودن ضرایب تبیین) امکان‌پذیر است ولی با استفاده از ثابت K (به دلیل پایین بودن ضرایب تبیین) دارای خطای بالا می‌باشد.

با افزایش سرعت جریان هوا هر یک به تنها یک 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 a₁b₁c₂ به درجه حرارت ۵۰°C (معادل با رطوبت نسبی ۱۵/۷٪) در تیمار a₁b₁c₃ سبب افزایش K از ۰/۲۰۶ (1/hr) به ۰/۲۹۹ (1/hr) شده و a₁b₁c₂ با افزایش سرعت جریان هوا از ۵/۰ متر بر ثانیه در تیمار a₁b₂c₂ باعث افزایش مقدار K از ۰/۳۶۳ (1/hr) به ۰/۲۰۶ (1/hr) شده است که هر دو در سطح ۱٪ معنی‌دار هستند.

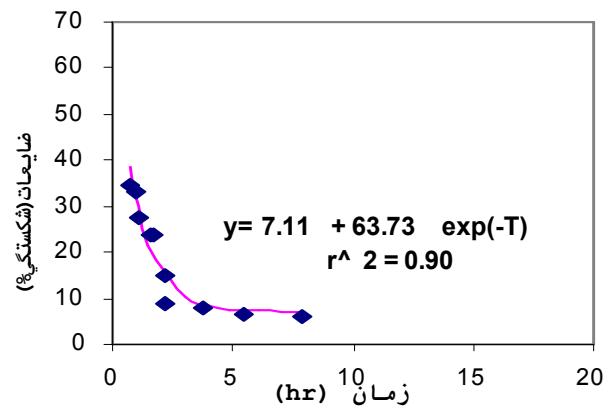
کاهش رطوبت نهایی محصول نیز بر مقدار K مؤثر است (سایر شرایط ثابت)، ولی چنانچه در جدول ۱ مشاهده می‌شود کاهش رطوبت نهایی تأثیر مشخصی بر روند تغییرات K ندارد به عنوان مثال کاهش رطوبت نهایی از ۱۴٪ در تیمار a₁b₁c₁ به ۱۰٪ در تیمار a₂b₁c₁ باعث افزایش مقدار K از ۰/۱۳۵ (1/hr) به ۰/۱۷۵ (1/hr) شده است (که البته در سطح ۱٪ آماری معنی‌دار نمی‌باشد) در حالی که کاهش رطوبت نهایی از ۱۴٪ در تیمار a₁b₂c₂ به ۱۰٪ در تیمار a₂b₂c₂ 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

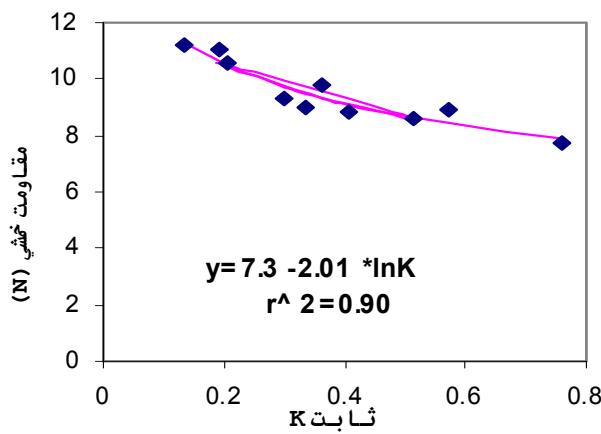
پس از تجزیه واریانس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، مشخص شد تیمارهای به کار رفته بر ضایعات (درصد شکستگی) و مقاومت خمی محصول، دارای اثر معنی‌دار می‌باشند. مقایسه میانگین‌های به دست آمده از آزمون دانکن در جدول ۱ ارائه شده است. اعداد نشان می‌دهند که افزایش دما، افزایش سرعت جریان هوا و کاهش رطوبت نهایی محصول 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



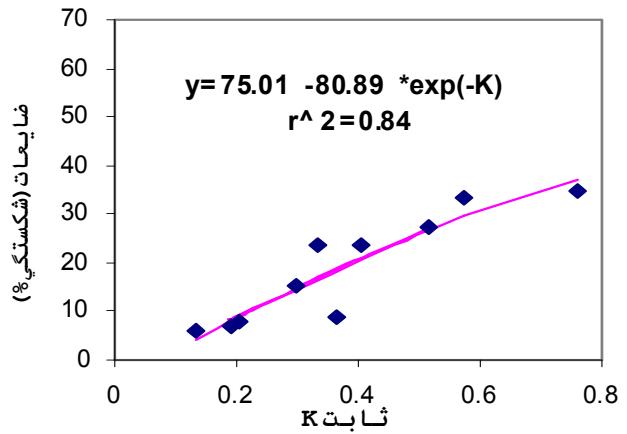
شکل ۶. ارتباط مقاومت خمی با زمان کاهش
رطوبت در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۴٪



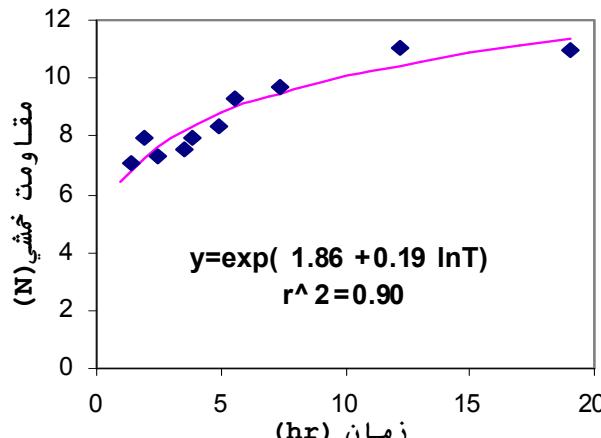
شکل ۵. ارتباط ضایعات تبدیل با زمان کاهش
رطوبت در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۴٪



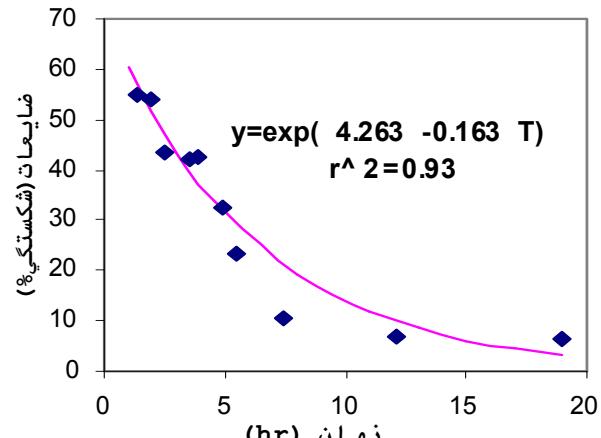
شکل ۸. ارتباط مقاومت خمی با ثابت K
در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۴٪



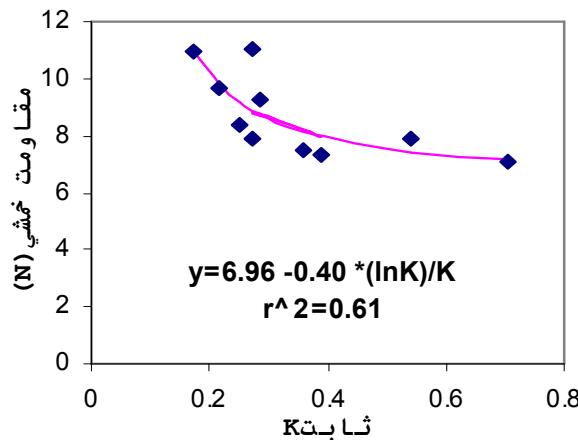
شکل ۷. ارتباط ضایعات تبدیل با ثابت K
در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۴٪



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

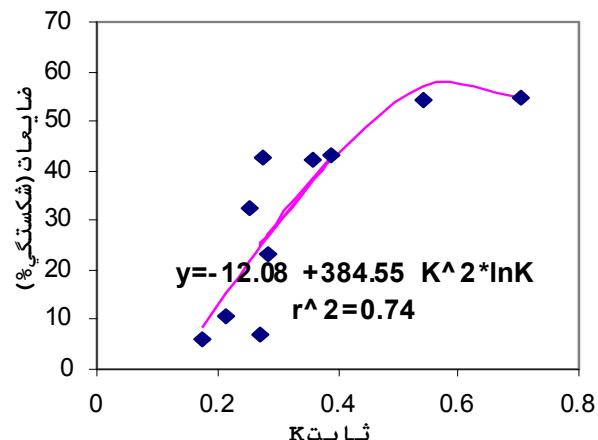


شکل ۹. ارتباط ضایعات تبدیل با زمان کاهش
رطوبت در دامنه رطوبتی ۲۰/۵٪ تا ۱۰/۵٪



شکل ۱۲. ارتباط مقاومت خمی با ثابت K

در دامنه رطوبتی ۲۰/۵ تا ۱۰/۵٪



شکل ۱۱. ارتباط ضایعات تبدیل با ثابت K

در دامنه رطوبتی ۲۰/۵ تا ۱۰/۵٪

بحث

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

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

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

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

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 میان محصول و محیط اطراف، سرعت انتقال جرم (رطوبت) از دانه به محیط افزایش پیدا می‌کند (۵ و ۲۲).

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).

می شود، بلکه از افزایش ضایعات در مرحله تبدیل نیز جلوگیری می کند.

ب) با توجه به نتایج به دست آمده در آزمایش ها، در رطوبت نهایی ۱۴٪، بهترین ترکیب دما و سرعت جریان هوا در خشک کن به منظور کاهش زمان خشک شدن و همچنین کاهش ضایعات در مرحله تبدیل، دمای ۴۰ درجه سانتی گراد و سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه می باشد که زمان ۲/۱۳ ساعت و درصد شکستگی ۸/۶۴٪ را به خود اختصاص داده است.

ج) برآورد ضایعات ناشی از شکستگی محصول در مرحله تبدیل، با استفاده از زمان و یا ثابت سرعت خشک شدن (K) امکان پذیر است که البته این برآورد، با استفاده از پارامتر زمان خشک شدن از خطای کمتر برخوردار می باشد.

محصول می باشد. آنان در تحقیق خود با افزایش ظرفیت تبخیر هوا و به تبع آن کاهش زمان فرایند خشک شدن، افزایش معنی داری 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 مانع دار با یکدیگر هستند و با کاهش مقدار K می توان از افزایش ضایعات تبدیل ممانعت کرد (۶).

نتیجه گیری

الف) رطوبت نهایی ۱۴٪ (نسبت به رطوبت نهایی ۱۰/۵٪) نه تنها موجب صرفه جویی قابل توجه در زمان فرایند خشک شدن

منابع مورد استفاده

- ارقامی، ن. و. ا. بزرگ نیا. ۱۳۷۰. آمار چند متغیره کاربردی. (تألیف کارتر سریو استراوا). چاپ اول، آستان قدس رضوی، مشهد.
- بی نام. ۱۳۷۶. برنج در آئینه آمار. انتشارات اداره کل آمار و اطلاعات وزارت کشاورزی، بلوار کشاورز، تهران.
- Anonymous, 2000. ASAE Standards. S 352.2 DEC 92: Moisture measurement –unground grain and seeds. 47th ed., Joseph. MI., USA.
- Bala, B. K. and J. H. Woods. 1992. Thin layer drying models for malt. *J. Food Eng.* 16: 239-49.
- Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema and C. W. Hall. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. The AVI Pub. Company, USA.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kunze, O. R. 1979. Fissuring of the rice grain after heated air drying. *Trans. ASAE* 22: 1197-207.
- Kunze, O. R. and M. Choudhury. 1972. Moisture adsorption related to the tensile strength of rice. *Cereal Chem.* 49: 684-96.
- Kunze, O. R. and S. Prasad. 1978. Grain fissuring potentials in harvesting and drying of rice. *Trans. ASAE* 21: 361-66.
- Lan,Y. and O. R. Kunze. 1996. Relative humidity effects on the development of fissures in rice. *Cereal Chem.* 73: 222-24.
- 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.
- Mohsenin, N. N. 1989. Physical Properties of Plants and Animal Materials. 2nd ed., USA.
- Montgomery, D. C. 1991. Design and Analysis of Experiments. 3rd ed., USA.
- 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.

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.