

## بررسی ارتباط زمان و ثابت سرعت خشک شدن (K) با پارامترهای خشک کن و ضایعات (درصد شکستگی) برنج در مرحله تبدیل

مجید سلیمانی<sup>۱</sup> و محمد شاهدی<sup>۲</sup>

### 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 می باشد. 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 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 آزمایش ها نشان داد که افزایش درجه حرارت و سرعت جریان هوا در خشک کن باعث کاهش زمان و برعکس باعث افزایش ثابت سرعت کاهش رطوبت (K) در محصول می شود. همچنین مشخص شد کاهش رطوبت نهایی محصول علی رغم این که باعث افزایش معنی دار زمان فرایند می شود ولی بر ثابت K اثر معنی دار ندارد. آزمون هم بستگی نشان داد که در دامنه رطوبتی مشخص (۲۰/۵٪ الی ۱۴٪ و یا ۲۰/۵٪ الی ۱۰/۵٪) میزان ضایعات (درصد شکستگی) برنج در مرحله تبدیل با زمان خشک شدن هم بستگی منفی و با ثابت K هم بستگی مثبت دارد در حالی که این دو شاخص با مقاومت خمشی محصول به ترتیب هم بستگی مثبت و منفی دارند. برآزش خصوصیات کیفی شامل ضایعات در مرحله تبدیل و مقاومت خمشی محصول بر حسب زمان و یا ثابت سرعت خشک شدن مشخص کرد که با استفاده از متغیر زمان می توان برآورد دقیق تری برای خصوصیات کیفی مذکور به دست آورد.

واژه های کلیدی: فرایند خشک کردن، شلتوک، تبدیل، سینتیک خشک شدن، کیفیت

### مقدمه

بودن رطوبت نسبی هوا، روش های طبیعی دارای کارایی پایین هستند) بیشتر کاربرد دارد، استفاده از خشک کن های مکانیکی است. در این خشک کن ها با استفاده از جابه جایی

از جمله روش هایی که برای کاهش رطوبت برنج قابل استفاده می باشد 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 پایین تر از رطوبت بحرانی، در مقابل عوامل مذکور به شدت حساس می باشد (۷ و ۱۳).

در سال ۱۹۹۴ توسط پتی و همکاران مطالعه‌ای در ارتباط با بهینه‌سازی فرایند خشک کردن 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 معنی دار دارند (۱۹). به عنوان مثال در دمای  $45^{\circ}\text{C}$  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 می کند 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 می یابد. 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 می شود. همچنین در دمای ثابت، افزایش ظرفیت تبخیر منجر به افزایش شکنندگی و ضایعات تبدیل می شود (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 می باشد که البته می توان تا حدودی با کاهش ظرفیت تبخیر هوای خشک‌کن از اثر نامطلوب آن کاست (۸).

اجباری هوای گرم، سرعت افت رطوبت در محصول افزایش پیدا می کند و در زمان خشک شدن صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای صورت می گیرد. ولی چنانچه این فرایند به صورت کنترل نشده انجام شود منجر به افزایش ضایعات در مرحله تبدیل شلتوک به برنج سفید و در نتیجه کاهش ارزش اقتصادی محصول می شود زیرا در مرحله پوستگیری و سفید کردن، نیروهای خمشی و سایشی به محصول وارد می شوند 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 امکان پذیر است ولی چنانچه این افزایش به صورت کنترل نشده و فقط به منظور صرفه جویی در زمان انجام شود، می تواند 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، تنش هایی است که در نتیجه دفع رطوبت در آن ایجاد می گردد. کاز و چادهری پژوهشی را در ارتباط با تأثیر دفع رطوبت بر تنش ها و مقاومت بافتی این محصول انجام دادند. طی این بررسی به این نتیجه رسیدند که در مرحله خشک شدن، سلول های خارجی دانه با از دست دادن رطوبت، کاهش حجم داده و چروکیده می شوند. در این حالت قسمت های داخلی و مرکزی دارای محتوای رطوبتی بالاتر نسبت به قسمت های سطحی هستند. این پدیده منجر به ایجاد تنش کششی در سطح و تنش تراکمی در مرکز دانه می شود که خود می تواند با ایجاد ترک در محصول مقاومت آن را در مقابل نیروهای خمشی و یا کششی کاهش دهد. البته این حالت معمولاً در شرایطی اتفاق می افتد که نوسانات رطوبتی در دانه یعنی دفع رطوبت با سرعت انجام گیرد. به عبارتی چنانچه پدیده های 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 °C ۵ نگره‌داری 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 °C ۱۳۰ 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 دو سطح: ۱۴ و ۱۰/۵ 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 به‌طور هم‌زمان در ۴ دستگاه خشک‌کن (هر یک مجهز به دمنده سانتریفوژی و توان تولید جریان هوا تا سرعت ۲ متر بر ثانیه و سیستم کنترل دما با دقت °C ۱ ±) 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 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 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 و  $P_v/P_s$  رطوبت نسبی محیط به اعشار می‌باشد. E، F و C

لیو و سبینمرگن 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 وسیله 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 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 خمشی در لحظه 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 مرحله تبدیل، ج) ارائه 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

## 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 شیب 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 جریان هوا در خشک کن از ۰/۵ به ۲ متر بر ثانیه باعث مقداری افزایش در شیب 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 جریان هوا و درجه حرارت ثابت هستند مشاهده می کنیم که شیب 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).

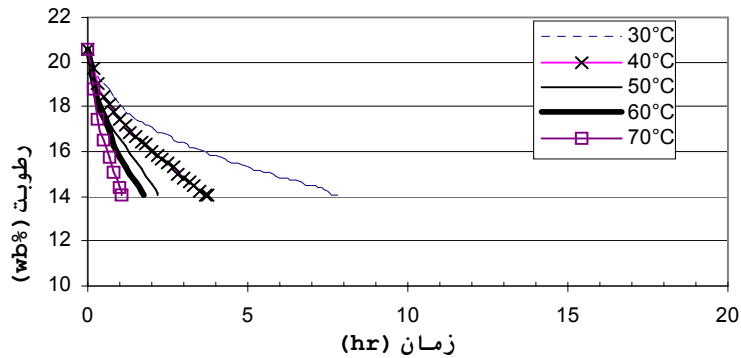
این جدول بیانگر این مطلب است که زمان کاهش رطوبت محصول تابعی از هر ۳ عامل رطوبت نهایی محصول، سرعت جریان و درجه حرارت هوای خشک کن می باشد. به طوری که در این جدول دیده می شود در سطوح یکسان سرعت جریان هوا و رطوبت نهایی، افزایش دما در دامنه ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتی گراد در تمام سطوح منجر به کاهش معنی دار زمان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

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

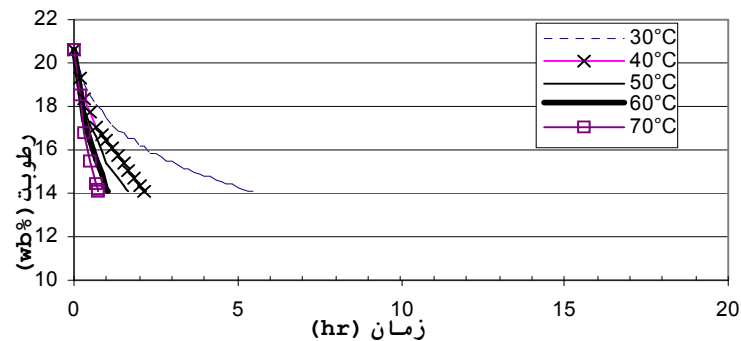
پس از این مرحله، آزمایش های مربوط به تعیین مقاومت خمشی و تعیین ضایعات در مرحله تبدیل به برنج سفید صورت گرفت. برای تعیین مقاومت خمشی از دستگاه اینستران مدل ۱۱۴۰ ساخت انگلیس استفاده شد. بدین منظور دو سر دانه شلتوک برنج روی دو تکیه گاه قرار می گرفت و تیغه (Probe) متصل به سنسور دستگاه که به ثبت کننده (Recorder) 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 شلتوک 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 سفیدکن سایشی (ساخت کمپانی ساتاکه ژاپن) انتقال یافت. عمل پولیش زنی هر نمونه در دستگاه سفیدکن 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 شلتوک اولیه مشخص شد و برای بیان ضایعات (میزان شکستگی) به صورت درصد محاسبه گردید (۵ و ۲۰).

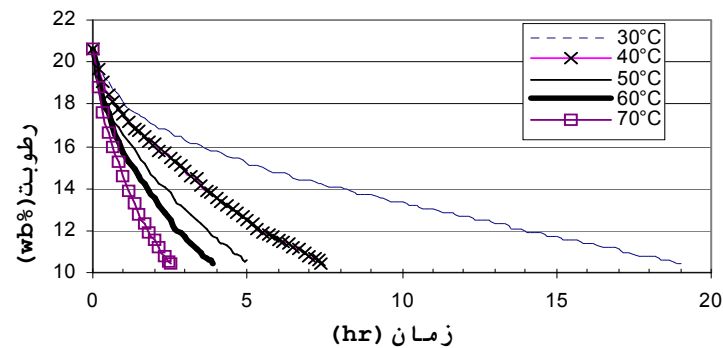
محاسبات آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزارهای SAS و Excel انجام گرفت.



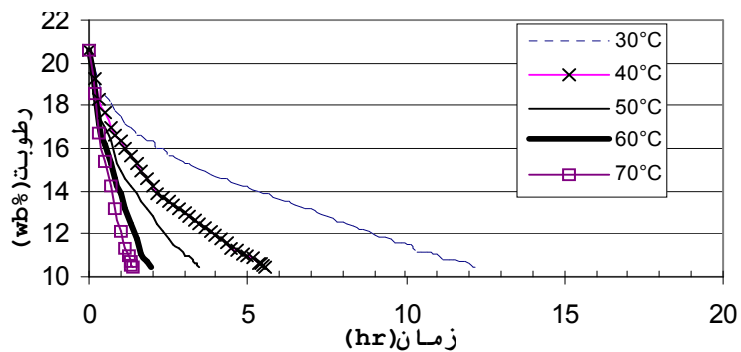
شکل ۱. منحنی‌های رطوبتی در دماهای مختلف و سرعت جریان ۰/۵ متر بر ثانیه (رطوبت نهایی ۱۴٪)



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



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



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

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

تیمار	زمان (hr)	کسر رطوبتی (MR)	ثابت K (1/hr)	مقاومت خمشی (N)	ضایعات (شکستگی) (%)
a <sub>1</sub> b <sub>1</sub> c <sub>1</sub>	۷/۸۳ <sup>c</sup>	۰/۳۴۸	۰/۱۳۵ <sup>k</sup>	۱۱/۱۸ <sup>a</sup>	۶/۰۴ <sup>l</sup>
a <sub>1</sub> b <sub>1</sub> c <sub>2</sub>	۳/۷۵ <sup>gh</sup>	۰/۴۶۲	۰/۲۰۶ <sup>ij</sup>	۱۰/۵۴ <sup>ab</sup>	۷/۹ <sup>jk</sup>
a <sub>1</sub> b <sub>1</sub> c <sub>3</sub>	۲/۲۱ <sup>j</sup>	۰/۵۱۷	۰/۲۹۹ <sup>efg</sup>	۹/۳۴ <sup>abcd</sup>	۱۵/۱۴ <sup>h</sup>
a <sub>1</sub> b <sub>1</sub> c <sub>4</sub>	۱/۷۵ <sup>kl</sup>	۰/۵۵۷	۰/۳۳۴ <sup>def</sup>	۸/۹۷ <sup>bcd</sup>	۲۳/۶۲ <sup>g</sup>
a <sub>1</sub> b <sub>1</sub> c <sub>5</sub>	۱/۰۶ <sup>n</sup>	۰/۵۷۹	۰/۵۱۶ <sup>b</sup>	۸/۶۰ <sup>bcd</sup>	۲۷/۳۲ <sup>f</sup>
a <sub>1</sub> b <sub>2</sub> c <sub>1</sub>	۵/۴۶ <sup>e</sup>	۰/۳۴۸	۰/۱۹۳ <sup>ijk</sup>	۱۱/۰۷ <sup>a</sup>	۶/۷۴ <sup>l</sup>
a <sub>1</sub> b <sub>2</sub> c <sub>2</sub>	۲/۱۳ <sup>j</sup>	۰/۴۶۲	۰/۳۶۳ <sup>cd</sup>	۹/۸۲ <sup>abc</sup>	۸/۶۴ <sup>j</sup>
a <sub>1</sub> b <sub>2</sub> c <sub>3</sub>	۱/۶۳ <sup>lm</sup>	۰/۵۱۷	۰/۴۰۵ <sup>c</sup>	۸/۸۷ <sup>bcd</sup>	۲۳/۷ <sup>g</sup>
a <sub>1</sub> b <sub>2</sub> c <sub>4</sub>	۱/۰۲ <sup>n</sup>	۰/۵۵۷	۰/۵۷۴ <sup>b</sup>	۸/۸۹ <sup>bcd</sup>	۳۳/۲۳ <sup>e</sup>
a <sub>1</sub> b <sub>2</sub> c <sub>5</sub>	۰/۷۲ <sup>o</sup>	۰/۵۷۹	۰/۷۵۹ <sup>a</sup>	۷/۷۱ <sup>def</sup>	۳۴/۷۴ <sup>d</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>1</sub> c <sub>1</sub>	۱۹/۰۰ <sup>a</sup>	۰/۰۳۶	۰/۱۷۵ <sup>jk</sup>	۱۰/۹۴ <sup>a</sup>	۶/۲۴ <sup>l</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>1</sub> c <sub>2</sub>	۷/۳۸ <sup>d</sup>	۰/۲۰۵	۰/۲۱۵ <sup>hij</sup>	۹/۷ <sup>abc</sup>	۱۰/۶۸ <sup>i</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>1</sub> c <sub>3</sub>	۴/۹۶ <sup>f</sup>	۰/۲۸۶	۰/۲۵۲ <sup>ghi</sup>	۸/۳۶ <sup>cdef</sup>	۳۲/۲۷ <sup>e</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>1</sub> c <sub>4</sub>	۳/۸۸ <sup>g</sup>	۰/۳۴۶	۰/۲۷۴ <sup>fgh</sup>	۷/۹۳ <sup>cdef</sup>	۴۲/۶۸ <sup>bc</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>1</sub> c <sub>5</sub>	۲/۵۰ <sup>i</sup>	۰/۳۷۸	۰/۳۸۹ <sup>cd</sup>	۷/۳۲ <sup>ef</sup>	۴۳/۲۲ <sup>b</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>2</sub> c <sub>1</sub>	۱۲/۱۷ <sup>b</sup>	۰/۰۳۶	۰/۲۷۳ <sup>fgh</sup>	۱۱/۰۵ <sup>a</sup>	۶/۸۸ <sup>kl</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>2</sub> c <sub>2</sub>	۵/۵۴ <sup>e</sup>	۰/۲۰۵	۰/۲۸۶ <sup>fg</sup>	۹/۲۶ <sup>abcde</sup>	۲۳/۲۹ <sup>g</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>2</sub> c <sub>3</sub>	۳/۵۰ <sup>h</sup>	۰/۲۸۶	۰/۳۵۸ <sup>cde</sup>	۷/۵۳ <sup>def</sup>	۴۱/۹۹ <sup>c</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>2</sub> c <sub>4</sub>	۱/۹۶ <sup>ik</sup>	۰/۳۴۶	۰/۵۴۱ <sup>b</sup>	۷/۹۱ <sup>cdef</sup>	۵۴/۱۹ <sup>a</sup>
a <sub>2</sub> b <sub>2</sub> c <sub>5</sub>	۱/۳۸ <sup>m</sup>	۰/۳۷۸	۰/۷۰۵ <sup>a</sup>	۷/۰۵ <sup>f</sup>	۵۴/۷۶ <sup>a</sup>

a<sub>1</sub>= ٪۱۴      b<sub>1</sub>= ۰/۵m/s      c<sub>1</sub>= ۳۰°C      c<sub>3</sub>= ۵۰°C      c<sub>5</sub>= ۷۰°C  
 a<sub>2</sub>= ٪۱۰/۵      b<sub>2</sub>= ۲m/s      c<sub>2</sub>= ۴۰°C      c<sub>4</sub>= ۶۰°C

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<sub>e</sub>) محصول می شود و با کاهش رطوبت تعادلی مقدار کسر رطوبتی افزایش می یابد.

پس از تجزیه واریانس مشخص شد که اثر تیمارها بر ثابت K (شاخص مهم سینتیک کاهش رطوبت در محصول) در سطح ٪۱ معنی دار است و مطابق با جدول ۱، تحت تأثیر هر ۳ فاکتور اعمال شده در تیمارها قرار می گیرد. 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 می دهد که در وضعیتی که سایر شرایط ثابت باشد کاهش آن از سطح ٪۱۴ به ٪۱۰/۵ باعث افزایش معنی دار زمان می شود.

شاخص دیگر کسر رطوبتی (MR) است که در جدول ۱ مقادیر مربوط به آن در شرایط اعمال تیمارهای مختلف موجود است. مشاهده می شود 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 (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 به دست 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 دامنه ۲۰/۵٪ الی ۱۴٪ برآزش 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 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+، ۰/۸۰+ و ۰/۶۸- . بنابراین در این محدوده رطوبتی نیز هم‌بستگی زمان با ضایعات (درصد شکستگی) و مقاومت خمشی به ترتیب مثبت و هم‌بستگی ثابت K با ضایعات و مقاومت خمشی به ترتیب مثبت و منفی می‌باشد. معادلات حاصل از برآزش این دو ویژگی بر حسب زمان و ثابت سرعت افت رطوبت (K) در دامنه ۲۰/۵٪ تا ۱۰/۵٪ در شکل‌های ۹ الی ۱۲ ارائه شده است.

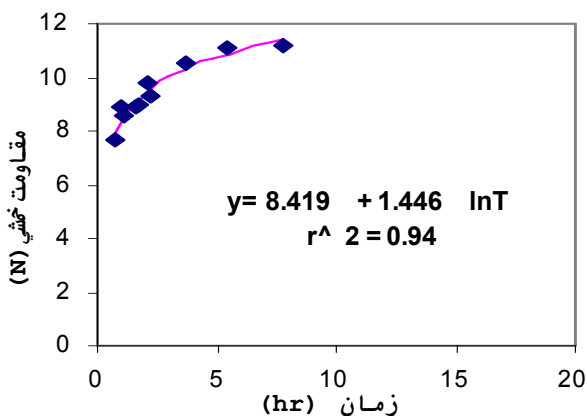
در این نمودارها دیده می‌شود، برآورد ضایعات (درصد شکستگی) و مقاومت خمشی با استفاده از زمان (با توجه به بالا بودن ضرایب تبیین) امکان‌پذیر است ولی با استفاده از ثابت K (به دلیل پایین بودن ضرایب تبیین) دارای خطای بالا می‌باشد.

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 ۰/۵ متر 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.

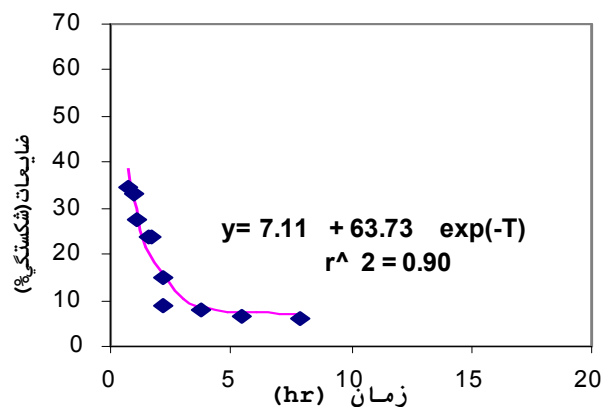
کاهش رطوبت نهایی محصول نیز بر مقدار K مؤثر است (سایر شرایط ثابت)، ولی چنانچه در جدول ۱ مشاهده می‌شود کاهش رطوبت نهایی تأثیر مشخصی بر روند تغییرات K ندارد به عنوان مثال کاهش رطوبت نهایی از ۱۴٪ در تیمار  $a_1b_1c_1$  به ۱۰/۵٪ در تیمار  $a_2b_1c_1$  باعث افزایش مقدار K از ۰/۱۳۵(1/hr) به ۰/۱۷۵(1/hr) شده 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

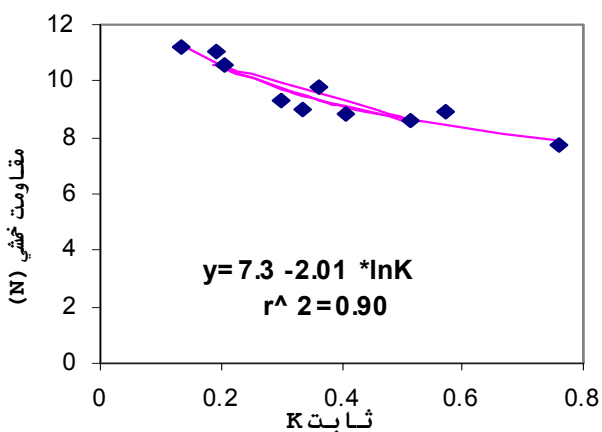
پس از تجزیه واریانس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، مشخص شد تیمارهای به کار رفته بر ضایعات (درصد شکستگی) و مقاومت خمشی محصول، دارای اثر معنی‌دار می‌باشند. مقایسه میانگین‌های به دست آمده از آزمون دانکن در جدول ۱ ارائه شده است. اعداد نشان می‌دهند که افزایش دما، افزایش سرعت جریان هوا و کاهش رطوبت نهایی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



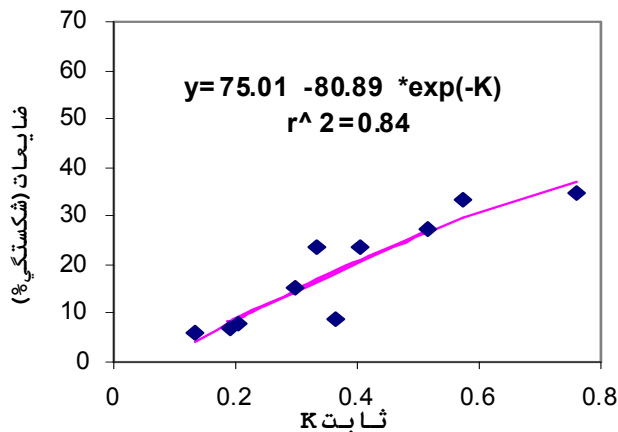
شکل ۶. ارتباط مقاومت خمشی با زمان کاهش رطوبت در دامنه رطوبتی ۲۰/۵ تا ۱۴٪



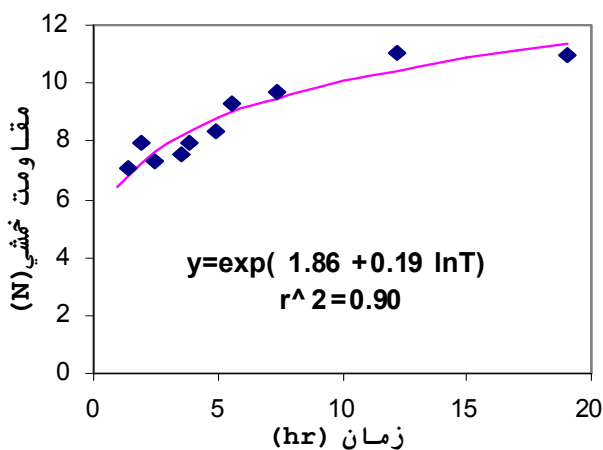
شکل ۵. ارتباط ضایعات تبدیل با زمان کاهش رطوبت در دامنه رطوبتی ۲۰/۵ تا ۱۴٪



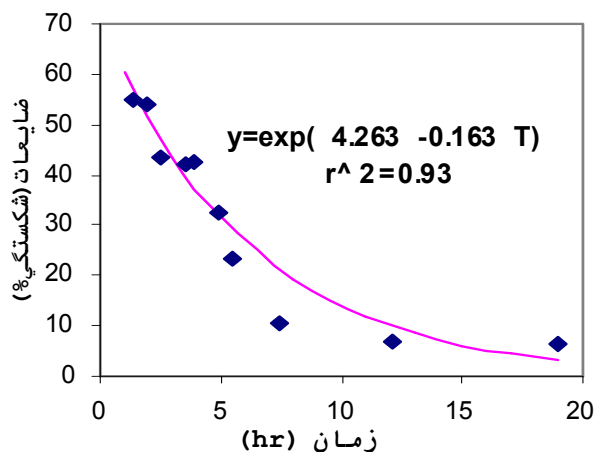
شکل ۸. ارتباط مقاومت خمشی با ثابت K در دامنه رطوبتی ۲۰/۵ تا ۱۴٪



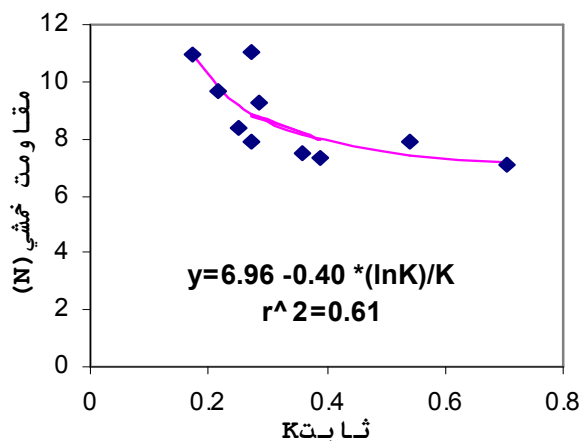
شکل ۷. ارتباط ضایعات تبدیل با ثابت K در دامنه رطوبتی ۲۰/۵ تا ۱۴٪



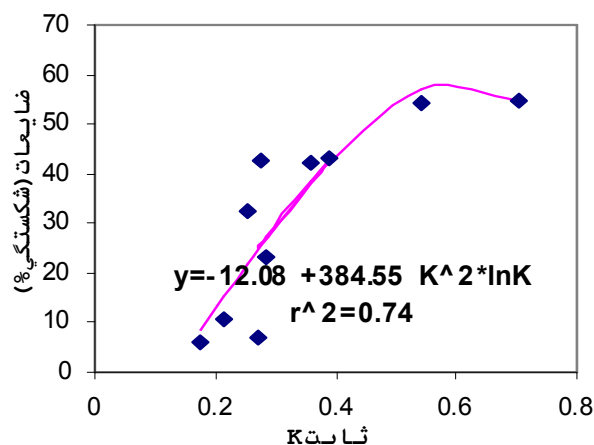
شکل ۱۰. ارتباط مقاومت خمشی با زمان کاهش رطوبت در دامنه رطوبتی ۲۰/۵ تا ۱۰/۵٪



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



شکل ۱۲. ارتباط مقاومت خمشی 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. 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 ثابت K 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 رابطه معکوس دارند.

مطالعاتی که کانز و چادهری 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 خوردگی 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

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 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).

می‌شود، بلکه از افزایش ضایعات در مرحله 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 مرحله 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 مرحله 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.

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

### 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. 2<sup>nd</sup> ed., USA.
17. Montgomery, D. C. 1991. Design and Analysis of Experiments. 3<sup>rd</sup> 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.

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. 2<sup>nd</sup> ed., Academic press, San. Diego, CA. USA.
22. Teter, N. 1987. Paddy Drying Manual. FAO of the U. N., Rome.