

مطالعه آزمایشگاهی خواص فیزیکی سیب زمینی در یک خشک کن ترکیبی با منابع حرارتی همرفتی و مادون قرمز

داریوش مولا*⁺

شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

بیژن هنرور

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

علی اکبر سیف کردی، محمد سلطانی، داریوش باستانی

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

چکیده: در این مطالعه، چگونگی محاسبه ضریب نفوذ مؤثر، دانسیته و چروکیدگی یک جسم استوانه‌ای شکل در یک خشک کن بستر سیالی حاوی ذره‌های حامل انرژی (FBD) با ترکیب منابع حرارتی هوای داغ و مادون قرمز (IR) مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور یک دستگاه آزمایشگاهی در مقیاس پیش‌تاز طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها در شرایط مختلف عملیاتی از نظر دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی، جرم ذرات خنثی، قطر ذره‌های خشک شونده و توان منبع حرارتی مادون قرمز انجام شد. دستگاه شامل یک خشک کن با بستر سیالی حاوی ذره‌های حامل انرژی با و بدون ترکیب با منابع حرارتی مادون قرمز می‌باشد. تأثیر پارامترهای عملیاتی گوناگون بر ویژگی‌های فیزیکی نمونه خشک شونده بررسی شد. از سیب زمینی به عنوان ماده خشک شونده استفاده گردید. ضریب نفوذ مؤثر به صورت تابعی از دمای هوا و میزان رطوبت ماده خشک شونده ارائه شده در حالی که دانسیته و چروکیدگی فقط تابع میزان رطوبت جسم خشک شونده می‌باشد. اثر توان حرارتی منبع مادون قرمز بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر بررسی و مشخص شد که مقدار ضریب نفوذ مؤثر با افزایش توان منبع حرارتی افزایش می‌یابد. تغییرهای چروکیدگی به صورت خطی و بر حسب میزان رطوبت بیان شده است. در هنگام استفاده از ترکیب امواج مادون قرمز چروکیدگی در ذرات به دلیل تشکیل یک پوسته سخت در اطراف ماده خشک شونده نسبت به خشک کن با بستر سیالی معمولی کاهش می‌یابد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که ترکیب حرارتی امواج مادون قرمز با هوای داغ، به دلیل مکانیسم تابشی و جذب انرژی توسط ماده خشک شونده اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی جسم خشک شونده دارد.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، بستر سیالی، امواج مادون قرمز، ضریب نفوذ مؤثر، چروکیدگی، سیب زمینی، ذرات حامل انرژی.

KEY WORDS: Drying, Fluidized bed, Infrared waves, Potato, Effective diffusivity, Shrinkage, Heat carrier particles.

مقدمه

فرایند خشک کردن در بیشتر صنایع از اهمیت عملی و اقتصادی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است که تاریخچه آن به آغاز تمدن بشر بازمی‌گردد. این عملیات به منظور حذف رطوبت از یک محصول و جلوگیری از فساد بیولوژیکی و رسیدن رطوبت ماده به رطوبت تعادلی انجام می‌شود.

فرایند خشک کردن یکی از مهمترین فرآیندهای انرژی‌بر در صنایع مختلف است. اجرای این فرایند در مقیاس صنعتی با راندمان حرارتی بالا به همراه حفظ کیفیت ماده خشک شونده از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌کارگیری فناوری‌های جدید از قبیل خشک کردن به روش بستر شناور [۳-۱]، خشک کردن در بستری سیالی حاوی ذرات حامل انرژی [۶-۴] و خشک کن‌های ترکیبی با مکانیسم‌های همرفتی و تابشی [۱۰-۷] در جهت بالا بردن سرعت خشک شدن و افزایش ظرفیت خشک کن‌ها به همراه کاهش ضایعات و کاهش تلفات انرژی لازم است.

مواد غذایی و مواد جامد مرطوب در حین خشک شدن، به دلیل خروج رطوبت دچار چروکیدگی می‌شوند. این پدیده قابل مشاهده می‌باشد و بر روی ویژگی‌های فیزیکی مواد جامد و پدیده‌های انتقال اثر می‌گذارد. مطالعات بسیاری با فرایندهای گوناگون روی این ویژگی‌ها انجام گرفته است. پژوهش‌گران با استفاده از نتیجه‌های مطالعه‌ها، رابطه‌های تجربی جهت تغییرهای چروکیدگی یک ذره بر حسب میزان رطوبت را برای یک ماده خشک شونده ارائه نموده‌اند. آنها حجم چروکیدگی را معادل آب تبخیر شده در نظر گرفتند. چروکیدگی سبزی‌های گوناگون بررسی شد و مدل‌های مختلفی مانند مدل خشک شدن یکنواخت، مدل خشک شدن هسته‌ای و مدل خشک شدن شبه هسته‌ای ارائه شد. در مدل خشک شدن یکنواخت میزان چروکیدگی متناسب با آب تبخیر شده در طی فرایند خشک شدن در نظر گرفته شده است اما در مدل هسته‌ای، خشک شدن از سطح ذره آغاز و به مرکز جسم ختم می‌شود و زمانی که سطح ذره خشک می‌شود رطوبت درون جسم تبخیر گردیده و از داخل قسمت خشک خارج می‌شود در حالی که در قسمت شبه هسته‌ای ترکیبی از هر دو حالت مورد توجه می‌باشد. مدل‌های هسته‌ای و شبه هسته‌ای تابع میزان رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و دانسیته توده می‌باشند.

مطالعه‌ها نشان می‌دهد که بین میزان رطوبت موجود در ماده و خواص فیزیکی یک رابطه قوی وجود دارد. چروکیدگی مواد

علاوه بر میزان رطوبت ماده به ساختمان مواد و شرایط عملیاتی نیز بستگی دارد. پدیده‌ی چروکیدگی بر روی ضریب نفوذ مؤثر و سرعت خشک شدن تأثیر می‌گذارد که از پارامترهای مهم در کنترل فرایند خشک شدن می‌باشد. کیفیت ماده غذایی در طی خشک شدن نه تنها تابع کیفیت اولیه آن بلکه به تغییرهای ویژگی‌ها در حین خشک شدن بستگی دارد. دانسیته ذره در حین خشک شدن تغییر می‌کند و علت آن تغییر شکل هندسی و خارج شدن رطوبت در حین خشک شدن می‌باشد. برای بررسی رفتار ماده خشک شونده، داشتن دانش کافی در رابطه با ویژگی‌های ماده در حین خشک شدن مانند دانسیته مفید می‌باشد. برای یافتن فرمول‌های تجربی برای محاسبه تغییرات فیزیکی مدل‌های تجربی متفاوتی برای میوه‌ها و سبزی‌های گوناگون بر اساس کار و تحقیق آزمایشگاهی ارائه شده است [۱۲، ۱۱].

یکی دیگر از پارامترهای مهم در فرایند خشک کردن محاسبه ضریب نفوذ مؤثر می‌باشد. سرعت انتقال رطوبت در داخل ماده با مکانیسم‌های مختلفی از جمله نفوذ ملکولی، موئین، نودسن، فشار و سطح انجام می‌گیرد. مطالعه دقیق انتقال جرم نیازمند در نظر گرفتن کلیه مکانیسم‌های انتقال رطوبت از داخل ماده به روی سطح می‌باشد لذا ضریب نفوذ مؤثر این قابلیت را دارد که با در نظر گرفتن تغییرهای رطوبت ذره نسبت به زمان با مکانیسم‌های گوناگون بتواند چگونگی انتقال را بیان نماید و اثر همه پارامترهای موجود را در بر داشته باشد. ضریب نفوذ مؤثر یک خاصیت انتقالی مهم در فرایند خشک کردن می‌باشد و در بعضی مطالعه‌ها فقط به صورت تابعی از دما و در بعضی دیگر به صورت تابعی از دما و میزان رطوبت بیان شده است. به دلیل تفاوت در ترکیبات مواد غذایی و ساختمان فیزیکی آنها برآورد دقیق این خواص مشکل می‌باشد. در این مطالعه پژوهش‌های آزمایشگاهی خشک شدن یک نمونه استوانه‌ای مانند سیب زمینی جهت برآورد خواص فیزیکی از جمله چروکیدگی، دانسیته و ضریب نفوذ در دو سیستم خشک کن FBD + IR, FBD انجام شده است و روابطی جهت محاسبه ویژگی‌های فیزیکی پیشنهاد شده است [۱۵-۱۳].

بخش تجربی**مواد و روش‌های انجام آزمایش‌ها**

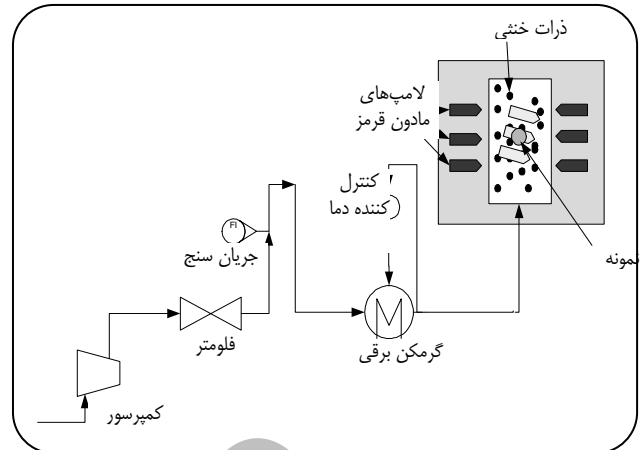
در این تحقیق سیب زمینی به عنوان ماده خشک شونده استوانه‌ای انتخاب شده است. برش‌های استوانه‌ای سیب زمینی به شکل استوانه‌ای با استفاده از قالب‌های فلزی که درون سیب زمینی



شکل ۲- تصویرهایی از خشک کن در مقیاس پیشتاز.

مجهز به سیستم کنترل دما، وارد بستر می‌شد و مواد بی اثر که نقش حامل انرژی را ایفا می‌نمود را به حالت شناور در می‌آورد. دستگاه بعد از ۲ ساعت عملیات پیوسته به حالت پایدار می‌رسید. دمای هوای ورودی با دقت ± 0.1 °C تنظیم می‌شد. برای اندازه‌گیری میزان رطوبت هوا از یک دستگاه رطوبت سنج الکترونیکی در ورود و خروج هوا استفاده می‌شد. برای انجام آزمایش یک نمونه منفرد در بستر سیالی آویزان شده و به حالت غوطه‌ور در می‌آمد. در حین آزمایش، اندازه‌گیری جرم، دمای سطح ذره، و دمای مرکز ذره، اندازه‌گیری طول و قطر نمونه در مکان‌های گوناگون در فاصله‌های زمانی مشخص انجام می‌شد. در هر اندازه‌گیری از یک نمونه استفاده شده و در آزمایش بعدی از نمونه جدید استفاده می‌شد. برای اندازه‌گیری دما از یک ترموکوپل دیجیتالی K-type استفاده می‌شد. هر آزمایش جهت بالا بردن دقت اندازه‌گیری ۲ مرتبه تکرار می‌شد. سرعت هوا با یک سرعت سنج دیجیتالی با دقت اندازه‌گیری می‌شد. متوسط توان حجمی گرمای تولید شده با امواج الکترومغناطیس به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شد. با قرار دادن آب و جوهر مرکب سیاه در ظروف شیشه‌ای با ابعاد مختلف استوانه‌ای شکل، متوسط گرمای تولیدی در مکان‌های متفاوت بستر به عنوان گرمای تولید شده با مکانیسم امواج مادون قرمز مطابق معادله زیر اندازه‌گیری می‌شد. شرایط عملیاتی در جدول ۱ ارائه شده است.

$$Q_r = \frac{Q_{\text{latent heat}} + Q_{\text{sensible heat}}}{V \cdot \Delta t} \quad (1)$$



شکل ۱- شما تیک خشک کن بستر سیالی حاوی ذرات حامل انرژی با ترکیب امواج مادون قرمز.

فرو برده می‌شود به دست می‌آید. در این مطالعه از سه قالب با قطرهای ۵/۶، ۸/۴ و ۹/۸ میلی متر با طول‌های مختلف استفاده می‌شود. برش‌های سیب زمینی در یک ظرف پلاستیکی سر بسته در دمای ۴ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت درون یخچال نگهداری می‌شود تا به رطوبت تعادلی برسند.

رطوبت اولیه سیب زمینی در هنگام آزمایش در حدود ۷۴ درصد بر مبنای مرطوب می‌باشد. با استفاده از یک کوره الکتریکی، نمونه‌های ماده خشک شونده کاملاً خشک می‌شوند. برای اندازه‌گیری جرم از یک ترازوی الکترونیکی با دقت ± 0.0001 گرم استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری حجم نمونه خشک شونده، با غوطه‌ورسازی برش سیب زمینی در محلول تولوئن با استفاده از روش جابجایی مایع در پیکنومتر به روش وزنی اندازه‌گیری انجام می‌شود.

جهت خشک کردن نمونه‌ها یک دستگاه خشک کن در مقیاس پیشتاز به صورت بستر شناور و با ذرات حامل انرژی و با استفاده از ترکیب منابع حرارتی هوای داغ و مادون قرمز طراحی و ساخته شد. شما و تصویرهای دستگاه آزمایشگاهی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. از سه نوع لامپ متفاوت به عنوان منابع حرارتی مادون قرمز استفاده شد. از یک دستگاه تنظیم کننده آمپر جریان برای کنترل توان الکتریکی منابع حرارتی مادون قرمز استفاده شد. با ایجاد سوراخهایی در یک صفحه دایره‌ای از جنس تفلون به ضخامت ۳ cm و نصب آن در محل ورودی جریان هوای داغ، هوا به صورت یکنواخت به داخل بستر خشک کن هدایت می‌شد.

خشک کن از یک لوله استوانه‌ای به قطر ۷۸ میلی‌متر ساخته شده است. هوا از پایین دستگاه بعد از عبور از گرم کن الکتریکی

جدول ۱- شرایط عملیاتی آزمایش‌های در خشک‌کن.

Run #	Diameter Of Sample, mm	Amount Of Sample g	Number of Sample	Inlet Air Velocity, m/s	Inlet Of Air Temperature °C	Amount of Inert, g	Type of Experiment	L/D
۱	۸,۴۱	۳,۳۳	۱	۵,۵	۴۵	۳۰۰	FBD	۶
۲	۸,۴۱	۳,۳۰	۱	۵,۵	۴۵	۳۰۰	FBD with IR	۶
۳	۸,۴۱	۳,۳۴۸	۱	۵,۵	۳۵	۳۰۰	FBD	۶
۴	۸,۴۱	۳,۳۵۲	۱	۵,۵	۳۵	۳۰۰	FBD with IR	۶
۵	۸,۴۱	۳,۳۵	۱	۵,۵	۵۵	۳۰۰	FBD	۶
۶	۸,۴۱	۳,۲	۱	۵,۵	۵۵	۳۰۰	FBD with IR	۶
۷	۸,۴۱	۳,۲۵	۱	۴,۵	۴۵	۳۰۰	FBD	۶
۸	۸,۴۱	۳,۲۵	۱	۴,۵	۴۵	۳۰۰	FBD with IR	۶
۹	۸,۴۱	۳,۳۳	۱	۳,۵	۴۵	۳۰۰	FBD with IR	۶
۱۰	۸,۴۱	۳,۲۹۲	۱	۳,۵	۴۵	۳۰۰	FBD	۶
۱۱	۸,۴۱	۳,۲۰	۱	۵,۵	۴۵	۴۰۰	FBD with IR	۶
۱۲	۸,۴۱	۳,۲۴	۱	۵,۵	۴۵	۴۰۰	FBD	۶
۱۳	۸,۴۱	۳,۲	۱	۵,۵	۴۵	۵۰۰	FBD with IR	۶
۱۴	۸,۴۱	۳,۲۵۷	۱	۵,۵	۴۵	۵۰۰	FBD	۶
۱۵	۸,۴۱	۳,۸	۱	۵,۵	۴۵	۳۰۰	FBD with IR	۷
۱۶	۸,۴۱	۳,۷۳	۱	۵,۵	۴۵	۳۰۰	FBD	۷
۱۷	۱۲,۸۵	۵,۷۸	۱	۴,۵	۴۵	۳۰۰	FBD with IR	۳
۱۸	۱۲,۸۵	۵,۸۲	۱	۴,۵	۴۵	۳۰۰	FBD	۳
۱۹	۹,۸۴	۳,۰۹	۱	۴,۵	۴۵	۳۰۰	FBD with IR	۴
۲۰	۹,۸۴	۳,۰۸	۱	۴,۵	۴۵	۳۰۰	FBD	۴
۲۱	۸,۴۱	۳,۲۵	۱	۵,۵	۳۵	۳۰۰	FBD	۶
۲۲	۸,۴۱	۳,۲	۱	۵,۵	۳۵	۳۰۰	۴۰۰W	۶
۲۳	۸,۴۱	۳,۳	۱	۵,۵	۳۵	۳۰۰	۵۰۰W	۶
۲۴	۸,۴۱	۳,۲۵	۱	۵,۵	۳۵	۳۰۰	۶۰۰W	۶

ضریب نفوذ مؤثر

تغییرهای ضریب نفوذ مؤثر در طی فرایند خشک شدن را می‌توان با استفاده از معادله‌های اساسی انتقال جرم در سیستم استوانه‌ای که از موازنه جرم بر روی المانی از نمونه حاصل می‌شود، به‌دست آورد. معادله عبارتست از:

$$\frac{\partial(\rho_p X)}{\partial t} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\rho_p r D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right) \quad (۲)$$

فرضیات مورد استفاده برای حل مدل ریاضی در مختصات استوانه‌ای عبارتند از:

- چروکیدگی در طی فرایند خشک شدن در نظر گرفته نمی‌شود.
- تغییرهای حجم به دلیل اینکه $L/D > 5$ می‌باشد در جهت

شعاعی است.

- مکانیسم خشک شدن به‌صورت یکنواخت می‌باشد.
- میزان رطوبت ماده به‌صورت یکنواخت در ماده توزیع شده است.
- ویژگی‌های ترموفیزیکی نمونه در طی خشک شدن ثابت و به‌طور متوسط محاسبه شده است.

شرایط اولیه و مرزی زیر برای حل معادله دیفرانسیلی جزئی فوق در نظر گرفته شده است، که عبارتند از:

at $t = 0 \quad 0 < r < R_p \quad X = X_0$ (۳ الف)

at $t > 0 \quad r = 0 \quad \frac{\partial X}{\partial r} = 0$ (۳ ب)

at $t > 0 \quad r = R_p \quad D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial r} = K_m (Y_s - Y_e)$ (۳ ج)

$$V/V_0 = (A \pm a)X + (B \pm b) \quad (7)$$

دانشیه

تغییرهای دانشیه نمونه سیب زمینی بر حسب تغییرهای میزان رطوبت بر مبنای خشک برای هر دو سیستم به صورت تابع چند جمله‌ای به صورت زیر ارائه شد:

$$\rho_p = aX^r + bX^r + cX + d \quad (8)$$

تغییرهای دانشیه به ساختمان ماده خشک شونده و میزان رطوبت موجود در آن مربوط می‌شود. فرایند خشک شدن علاوه بر کاهش جرم ماده خشک شونده بر حجم ماده نیز تأثیر نزولی دارد.

نتیجه‌ها و بحث

چروکیدگی

نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در تمامی موارد تغییرهای چروکیدگی نسبت به میزان رطوبت به صورت خطی می‌باشد. با به کارگیری عملیات ریاضی و استفاده از متوسط‌گیری از مقدارهای ثابت که برای هر آزمایش از تابع ریاضی به دست آمده است معادله پیشنهادی زیر برای پیش بینی چروکیدگی ارائه می‌شود.

$$V/V_0 = (0.162791 \pm 0.037)X + (0.191792 \pm 0.0727) \quad (9)$$

FBD R^r = 0.994

$$V/V_0 = (0.143345 \pm 0.041)X + (0.237791 \pm 0.0812) \quad (10)$$

FBD + IRR^r = 0.991

میزان چروکیدگی در شرایط عملیاتی گوناگون مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود افزایش سرعت هوا در سیستم FBD باعث افزایش سرعت خشک شدن شده و میزان چروکیدگی را افزایش می‌دهد در حالی که در سیستم FBD+IR با افزایش سرعت کاهش چروکیدگی رخ می‌دهد.

علت این امر تشکیل لایه سخت جلدی و اثر خنک کنندگی هوا در سیستم FBD+IR می‌باشد که دمای سطح نمونه در سیستم ترکیبی از دمای هوا گرمتر شده بنابراین حرارت از سطح ذره به هوا انتقال می‌یابد و در نتیجه سرعت خشک شدن با افزایش سرعت هوا کاهش می‌یابد.

دلیل اینکه چرا در این شکل از یک مقدار رطوبت به بعد اثر IR محسوس نیست آن است که جذب امواج مادون قرمز تابع رطوبت ماده خشک شونده می‌باشد و وقتی مقدار رطوبت در لایه نفوذ

کرنک در سال ۱۹۷۵ میلادی معادله زیر را برای حل معادله دیفرانسیل در مختصات استوانه‌ای ارائه نمود [۱۶، ۱۷].

$$MR = (X - X_e) / (X_0 - X_e) = \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^r} \exp\left[-\frac{\lambda_n^r D_{eff} t}{R_p^r}\right]$$

با در نظر گرفتن فقط جمله اول (n=1) و با انجام عملیات لگاریتم‌گیری به دست می‌آید:

$$\ln MR = \ln\left[\frac{(X - X_e)}{(X_0 - X_e)}\right] = \quad (5)$$

$$\ln\left(\frac{1}{\lambda_n^r} - \frac{\lambda_n^r D_{eff} t}{R_p^r}\right)$$

همانطور که در قسمت قبل بیان گردید جرم نمونه در زمان‌های گوناگون، اندازه‌گیری می‌شود و بر اساس آن میزان رطوبت ذره بر مبنای خشک محاسبه می‌گردد. با رسم مقدارهای $\ln MR$ بر حسب زمان یک خط با شیب $(\lambda_n^r D_{eff} / R_p^r)$ حاصل می‌شود. مقادیر D_{eff} بر حسب میزان رطوبت X و دمای مطلق T محاسبه می‌شود. برای پیش بینی ضریب نفوذ یک رابطه تجربی به صورت تابع نمایی به شکل زیر پیشنهاد می‌شود:

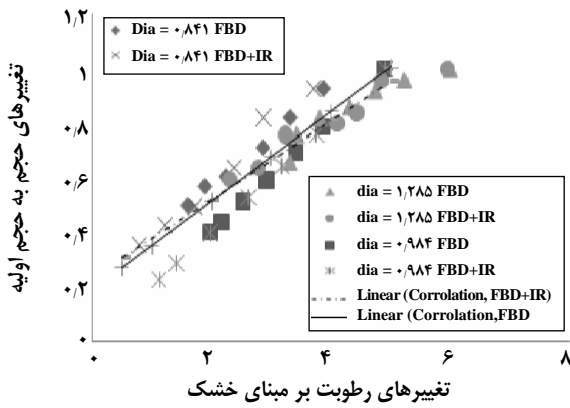
$$D_{eff} = D_0 \exp(-E_a / R_g T) \exp[(AX + B)T] \quad (6)$$

با استفاده از نتیجه‌های آزمایشگاهی برای ضریب نفوذ، دما و میزان رطوبت نمونه خشک شونده و استفاده از عملیات ریاضی مقدارهای A ، E_a/R_g ، D_0 و B برای شرایط عملیاتی گوناگون به دست می‌آید.

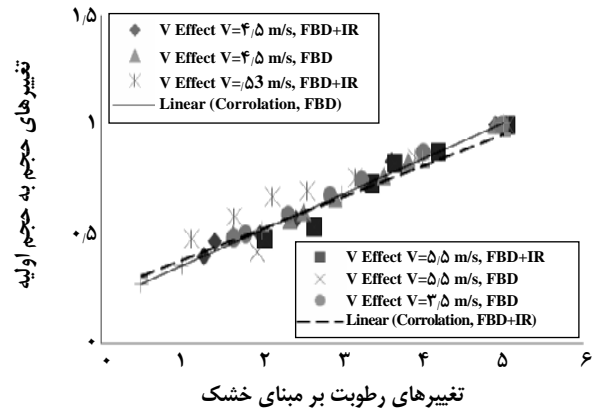
چروکیدگی

چروکیدگی یکی از ویژگی‌های قابل مشاهده در فرایند خشک شدن می‌باشد و در اثر خروج رطوبت موجود در مواد مرطوب و بر اساس ویژگی‌های ماده و شکل هندسی آن اتفاق می‌افتد. این پارامتر تأثیر بسیار زیادی بر شکل ظاهری و بازاریابی فراورده دارد و بر ویژگی‌های ترموفیزیکی فراورده اثر گذار می‌باشد.

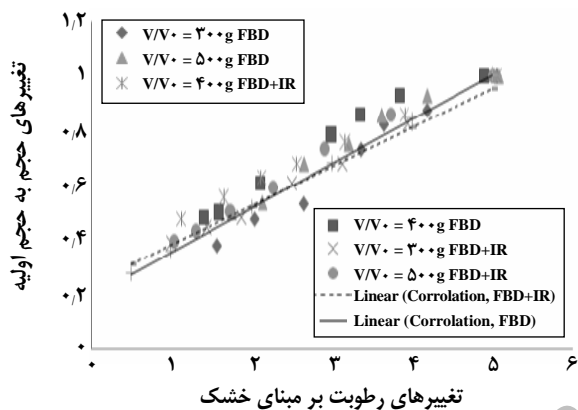
برای محاسبه میزان چروکیدگی به صورت تئوری رابطه‌های گوناگون قابل ارائه است ولی با توجه به اینکه تغییرهای چروکیدگی بر حسب میزان غلظت رطوبت به صورت یک تابع خطی است و میزان مجذور رگرسیون آن نزدیک به یک می‌باشد، لذا معادله خطی (۷) برای محاسبه چروکیدگی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸]:



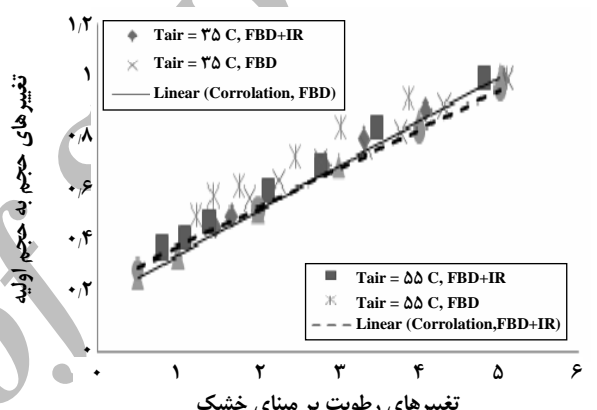
شکل ۵ - چروکیدگی سیب زمینی در اثر تغییرات قطر ماده خشک شونده.



شکل ۳ - چروکیدگی سیب زمینی در اثر تغییرات سرعت هوای ورودی.



شکل ۶ - چروکیدگی سیب زمینی در اثر تغییرات جرم ذرات خنثی.



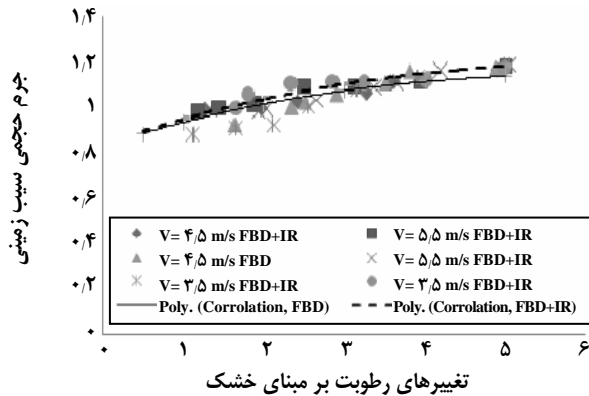
شکل ۴ - چروکیدگی سیب زمینی در اثر تغییرات دمای هوای ورودی.

نشان می‌دهد. افزایش جرم ذره‌های خنثی تا میزان مشخصی از ذره‌ها، تأثیر قابل توجهی بر میزان ضریب‌های انتقال حرارت و جرم می‌گذارد ولی از مقدار مشخصی به بعد تأثیر آن چندان اهمیتی ندارد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود افزایش جرم ذره‌های خنثی تأثیر قابل توجهی بر چروکیدگی ندارد.

دانشیه نمونه

نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در تمامی موارد تغییرهای دانشیه نسبت به میزان رطوبت به صورت تابع چندجمله‌ای می‌باشد. با به‌کارگیری عملیات ریاضی مقادیرهای ثابت در هر آزمایش به دست می‌آید و سپس با محاسبه میانگین، ثابت‌های تابع چند جمله‌ای تعیین می‌شود. تغییرهای دانشیه نمونه سیب‌زمینی برحسب میزان رطوبت در شکل‌های (Ya, Yb) نشان داده می‌شود. همانطوری که مشاهده می‌شود با افزایش میزان رطوبت مقدار دانشیه افزایش می‌یابد. روابط تجربی با استفاده از نتیجه‌های

که چند میلی‌متر ابتدایی سطح را شامل می‌شود کاهش یافت، تأثیر امواج مادون قرمز کم می‌شود و قابل ملاحظه نیست. در شکل ۴ تأثیر دما بر میزان چروکیدگی بررسی شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود دمای هوای ورودی باعث افزایش سرعت خشک شدن می‌شود و شدت تبخیر افزایش یافته و لذا میزان چروکیدگی افزایش می‌یابد. ترکیب امواج الکترو مغناطیسی از نوع مادون قرمز باعث کاهش میزان چروکیدگی می‌شود. استفاده از امواج مادون قرمز باعث ایجاد یک لایه سخت اطراف نمونه شده که در نتیجه میزان چروکیدگی را کاهش می‌دهد. تغییرهای قطر ماده خشک شونده بر میزان چروکیدگی مطالعه شده است. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود افزایش قطر ذره باعث کاهش سرعت خشک شدن و در نتیجه افزایش میزان چروکیدگی می‌گردد. ترکیب امواج مادون قرمز با بستر سیالی تأثیر چندان بر چروکیدگی نسبت به بستر سیالی ندارد. شکل ۶ تأثیر میزان جرم ذره‌های خنثی را بر میزان چروکیدگی



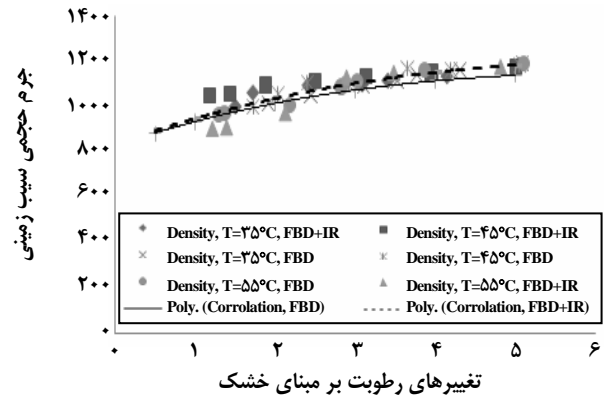
شکل ۷b- تغییرهای دانسیته سیب زمینی نسبت به سرعت هوا در هر دو سامانه FBD+IR و FBD.

$$D_{\text{eff}} = 1/29 * 10^{-6} \exp(-0.725 / X) \exp(-20.44/T) \quad (13)$$

برای بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر مقدار ضریب نفوذ مؤثر، تغییرهای D_{eff} در شرایط گوناگون در اشکال (۸ تا ۱۷) بررسی گردیده است.

شکل ۸ تغییرهای X را نسبت به زمان در دماهای مختلف نشان می‌دهد. افزایش دما باعث افزایش سرعت خشک شدن در هر دو سیستم می‌شود. شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش دما در هر دو سیستم، مقدار D_{eff} افزایش می‌یابد و ترکیب منبع حرارتی مادون قرمز باعث افزایش قابل توجهی در مقدار ضریب نفوذ مؤثر شده است. تغییرهای میزان رطوبت ماده خشک شونده در سرعت‌های گوناگون در شکل ۱۰ بررسی شده است.

همان طوری که مشاهده می‌شود افزایش سرعت در سامانه FBD باعث افزایش سرعت خشک شدن می‌شود، اما در سامانه FBD+IR با افزایش سرعت خشک شدن کاهش می‌یابد. که علت این پدیده اثر سرد کنندگی هوا در حالت ترکیبی است. تغییرها سرعت هوا بر ضریب نفوذ در شکل ۱۱ نشان داده می‌شود. همان طوری که مشاهده می‌شود افزایش سرعت در سامانه FBD منجر به افزایش ضریب نفوذ می‌شود اما در سامانه FBD+IR میزان این ضریب D_{eff} کاهش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان به انتقال حرارت معکوس در اثر افزایش سرعت هوا و گرم‌تر شدن ماده خشک شونده در اثر امواج مادون قرمز دانست. شکل ۱۲ تغییرهای D_{eff} را در توان‌های گوناگون امواج مادون قرمز نشان می‌دهد، با افزایش توان منبع حرارتی ضریب نفوذ افزایش می‌یابد.



شکل ۷a- تغییرهای دانسیته سیب زمینی نسبت به دما در هر دو سامانه FBD+IR و FBD.

هر آزمایش و با استفاده از مفهوم متوسط‌گیری برای هر دو سیستم به تفکیک به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\rho_p = 0.00057X^3 - 0.1455X^2 + 0.12087X + 0.827933 \quad (11)$$

$$FBD \quad R^2 = 0.9763$$

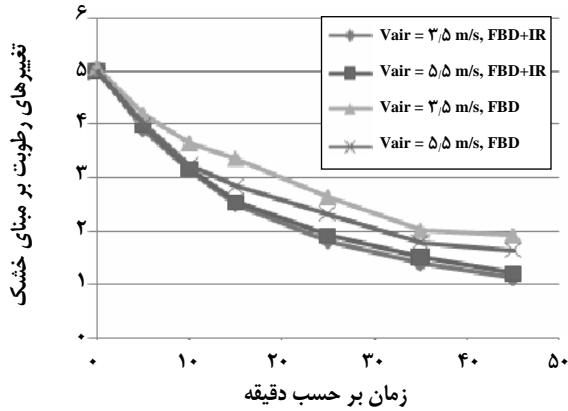
$$\rho_p = 0.00047X^3 - 0.1355X^2 + 0.12087X + 0.837 \quad (12)$$

$$FBD \quad R^2 = 0.9727$$

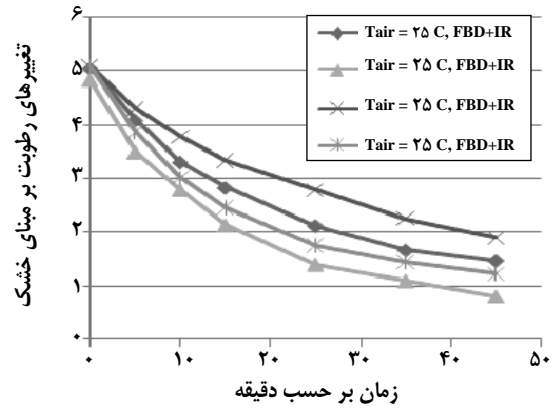
ضریب نفوذ مؤثر

اکثر پژوهشگران مقدار ضریب نفوذ مؤثر را به صورت تابعی از دما گزارش نموده‌اند اما در بعضی از پژوهش‌ها هم میزان ضریب نفوذ مؤثر به صورت تابعی از میزان رطوبت و دما گزارش شده است [۲۰، ۱۹]. سری کیاتدن و همکاران در ۲۰۰۶ میلادی مطالعه محاسبه ضریب نفوذ سیب زمینی و هویج را برای سیستم هوای داغ و ترکیب آن با حالت همدم انجام دادند. نتیجه‌های حاصل از این مطالعه و مقایسه آن با مطالعه حاضر در جدول ۴ نشان داده می‌شود، همانطوری که مشاهده می‌شود سامانه بستر شناور نسبت به هوای داغ به دلیل مخلوط شدن مواد خنثی با نمونه و از بین رفتن لایه مرزی بر روی سطح ماده از ضریب نفوذ بالاتری برخوردار است و ترکیب منبع حرارتی مادون قرمز با بسترهای سیالی به دلیل نفوذ امواج به داخل ماده خشک شونده و افزایش دما دارای ضریب نفوذ بالاتری می‌باشد [۲۱].

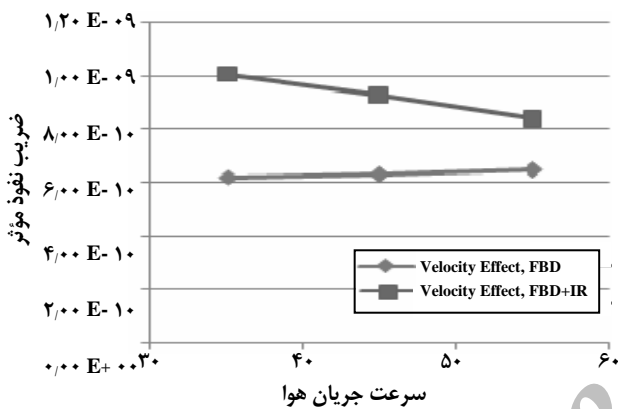
سابلانی و همکاران رابطه (۱۳) را برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر برای خشک شدن سیب زمینی ارائه نمودند [۲۲]:



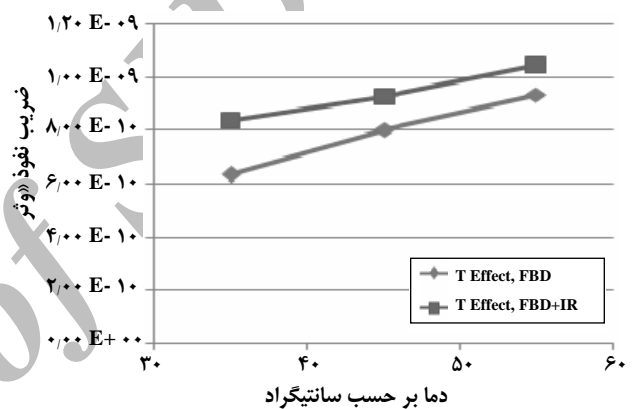
شکل ۱۰- تغییرهای رطوبت سیب زمینی در سرعت‌های گوناگون هوا.



شکل ۸- تغییرهای رطوبت سیب زمینی در دماهای گوناگون.



شکل ۱۱- تغییرهای ضریب نفوذ مؤثر در سرعت‌های گوناگون هوای ورودی.



شکل ۹- تغییرهای ضریب نفوذ مؤثر در دماهای گوناگون هوای ورودی.

$$D_{\text{eff}} = 0.000267 \exp(-3430/T) \times \exp[(-0.007852T + 2/586)X] \quad (15)$$

FBD

معادله‌های به‌دست آمده در فاصله دمایی ۳۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد و در محدوده میزان رطوبت برابر ۰.۳ تا ۵.۰ کیلوگرم رطوبت بر کیلوگرم ماده خشک صادق می‌باشد. برای بررسی دقت رابطه‌های تجربی فوق، نتایج حاصل از برآورد معادله‌های بالا با نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های گوناگون مقایسه و تطابق بسیار خوبی مشاهده شد. نتیجه‌های مقایسه در جدول ۲ ارایه شده است. میزان درصد خطای متوسط برابر ۷.۹۶ درصد و میزان انحراف بیشینه برابر ۱۵.۴ درصد می‌باشد. برای بیان درصد خطای متوسط از معادله (۱۶) استفاده شده است.

$$MAE \% = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{D_{\text{eff}}^{\text{Exp}} - D_{\text{eff}}^{\text{Cal}}}{D_{\text{eff}}^{\text{Exp}}} \right| \quad (16)$$

تغییرهای X بر حسب زمان برای اندازه‌های گوناگون نمونه خشک شونده و برای جرم‌های گوناگون مواد خنثی (حامل انرژی) در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده می‌شود. کاهش اندازه نمونه و افزایش جرم مواد خنثی باعث افزایش سرعت خشک شدن در هر دو سیستم می‌شود. تأثیر پارامترهای متفاوت بر سرعت خشک شدن نشان می‌دهد که می‌توان ضریب نفوذ مؤثر را به صورت تابعی از دما و میزان رطوبت بیان نمود.

در این مطالعه پیش بینی تغییرهای ضریب نفوذ مؤثر به صورت تابعی از میزان رطوبت و دما ارایه شده است.

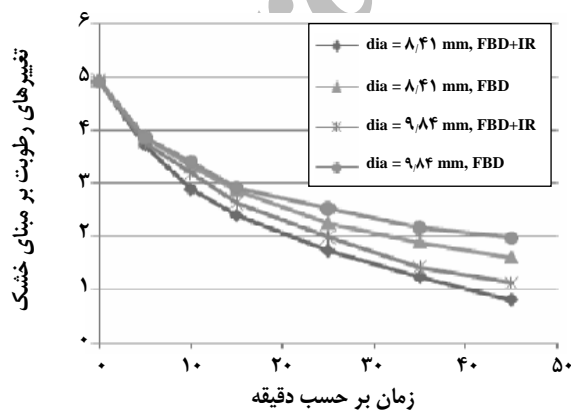
ثابت‌های معادله (۶) بر اساس نتیجه‌های آزمایشگاهی و عملیات ریاضی به صورت معادله‌های (۱۴) و (۱۵) در سیستم‌های گوناگون پیشنهاد شده است:

$$D_{\text{eff}} = 0.00013 \exp(-3120/T) \times \exp[(-0.00812 \pm 0.00035)T + 2/7]X] \quad (14)$$

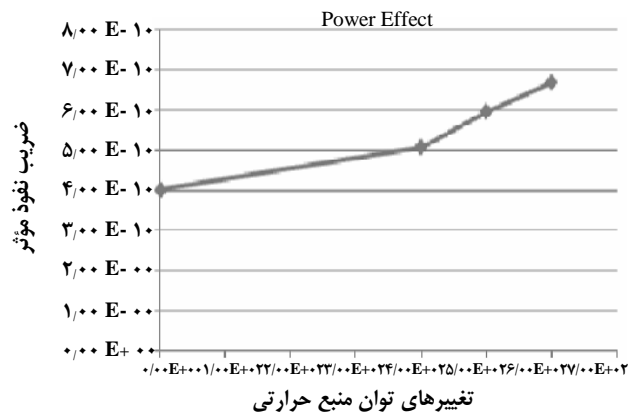
FBD+IR

جدول ۲- مقایسه بین نتیجه‌های به دست آمده از روابط تجربی با نتیجه‌های آزمایشگاهی و محاسبه درصد خطای متوسط.

T= ۳۵ °C, V= ۵,۵ m/s, FBD				T= ۴۵ °C, V= ۵,۵ m/s, FBD			
x	(Def _f) _{Exp}	(Def _f) _{cal}	MAE%	x	(Def _f) _{Exp}	(Def _f) _{cal}	MAE%
۴,۶۸۹۱	۸E-۱۰	۸,۵۴E-۱۰	۶,۷۵	۴,۶۲۳۸	۱E-۰۹	۸,۳۳E-۱۰	۸,۷
۴,۰۳۹۱	۷E-۱۰	۷,۶۶E-۱۰	۹,۴۲۸۵۷۱	۳,۹۲۲	۹E-۱۰	۷,۸۴E-۱۰	۶,۶۶۶۶۶۷
۳,۶۴۷۳	۶E-۱۰	۷,۱۸E-۱۰	۹,۴۲۸۵۷۱	۳,۴۳۵۵	۸E-۱۰	۷,۵۱E-۱۰	۸,۷
۳,۱۸۷۸	۶E-۱۰	۶,۶۵E-۱۰	۸	۲,۸۹۳۹	۸E-۱۰	۷,۱۶E-۱۰	۶,۱۲۵
۲,۵۹۳۳	۶E-۱۰	۶,۰۲E-۱۰	۱۰,۸۳۳۳۳	۲,۳۰۰۳	۷E-۱۰	۶,۷۹E-۱۰	۱۰,۵
۲,۱۹۳۶	۵E-۱۰	۵,۶۴E-۱۰	۰,۳۳۳۳۳۳	۱,۹۶۰۹	۷E-۱۰	۶,۵۹E-۱۰	۳
T=۵۵ °C, V=۵,۵ m/s, FBD				T=۳۵ °C, V=۵,۵ m/s, FBD+IR			
x	(Def _f) _{Exp}	(Def _f) _{cal}	MAE%	x	(Def _f) _{Exp}	(Def _f) _{cal}	MAE%
۴,۴۷۷۳	۱,۰۰E-۰۹	۸,۰۴E-۱۰	۱۹,۶	۴,۵۷	۱,۳۴E-۰۹	۱۱,۲۹E-۰۹	۳,۷۳۱۳۴۳
۳,۴۴۰۹	۹,۴۰E-۱۰	۷,۹۶E-۱۰	۱۵,۳۱۹۱۵	۳,۷۷	۱,۲۱E-۰۹	۱,۱E-۰۹	۹,۰۹۰۹۰۹
۲,۷۹۰۹	۸,۶۲E-۱۰	۷,۹۱E-۱۰	۸,۲۳۶۶۵۹	۳,۱۴۰۹	۱,۰۸E-۰۹	۹,۷E-۱۰	۱۰,۱۸۵۱۹
۲,۲۰۹۱	۸,۴۵E-۱۰	۷,۸۷E-۱۰	۶,۸۶۳۹۰۵	۲,۵۰۹۱	۹,۰۰E-۱۰	۸,۵۶E-۱۰	۴,۸۸۸۸۸۹
۱,۶۰۹۱	۸,۰۰E-۱۰	۷,۸۳E-۱۰	۲,۱۲۵	۱,۸۴۰۹	۸,۲۰E-۱۰	۷,۵E-۱۰	۸,۵۳۶۵۸۵
۱,۲۶۳۶	۸,۰۰E-۱۰	۷,۸E-۱۰	۲,۵	۱,۲۹۵۵	۷,۱۰E-۱۰	۶,۷۳E-۱۰	۵,۲۱۱۲۶۸
T=۴۵ °C, V=۵,۵ m/s, FBD+IR				T=۵۵ °C, V=۵,۵ m/s, FBD+IR			
x	(Def _f) _{Exp}	(Def _f) _{cal}	MAE%	x	(Def _f) _{cal}	(Def _f) _{Exp}	MAE%
۴,۴۴	۱,۳۸E-۰۹	۱,۲E-۰۹	۱۳,۰۴۳۴۸	۳,۹۹۵۵	۱,۱۱E-۰۹	۱,۳۱E-۰۹	۱,۵۳E+۰۱
۳,۳۵۱۸	۱,۰۰E-۰۹	۱,۰۶E-۰۹	۶	۲,۸۵	۱,۰۷E-۰۹	۱,۲۵E-۰۹	۱۴,۴
۲,۶۴۰۹	۱,۰۰E-۰۹	۹,۷۴E-۱۰	۲,۶	۲,۱۸۱۸	۱,۰۴E-۰۹	۱,۱۳E-۰۹	۷,۹۶۴۶۰۲
۱,۹۷۴۵	۱,۰۰E-۰۹	۹,۰۱E-۱۰	۹,۹	۱,۵۳۹۱	۱,۰۲E-۰۹	۱,۰۰E-۰۹	۲
۱,۳۴۵۵	۹,۴۵E-۱۰	۸,۳۸E-۱۰	۱۱,۳۲۲۷۵	۰,۹۵۷۳	۹,۹۹E-۱۰	۹,۵۲E-۱۰	۴,۹۳۶۹۷۵
۰,۹۷۲۷	۸,۸۰E-۱۰	۸,۰۲E-۱۰	۸,۸۶۳۶۳۶	۰,۶	۹,۸۶E-۱۰	۹,۱۰E-۱۰	۸,۳۵۱۶۴۸



شکل ۱۳- تغییرهای رطوبت سیبزمینی در قطره‌های گوناگون سیبزمینی.



شکل ۱۲- تغییرهای ضریب نفوذ مؤثر در توان‌های گوناگون منبع حرارتی مادون قرمز.

جدول ۳- انرژی اکتیواسیون برای خشک کردن سیب زمینی.

منابع	انرژی اکتیواسیون بر حسب کیلو ژول بر کیلو گرم	ماده خشک شونده
Yusheng & Poulsen (۱۹۸۸)	۱۵/۴۳	برش‌های سیب زمینی
Islam (۱۹۸۰)	۱۷/۸۴	برش‌های سیب زمینی
Afzal (۱۹۹۸)	۲۰/۵۷	برش‌های سیب زمینی
Saravacos (۱۹۶۲)	۲۹/۱۰	برش‌های سیب زمینی
Present Work (FBD+IR)	۲۵/۹۳	برش‌های سیب زمینی
Present Work (FBD)	۲۸/۵۱۷	برش‌های سیب زمینی

جدول ۴- مقایسه ضریب نفوذ مؤثر ارایه شده به وسیله سری کیاتدن و همکاران ۲۰۰۶ میلادی با مطالعه حاضر.

مطالعه حاضر $D_{eff} * 10^{-10}$		مطالعه سری کیاتدن و همکاران $D_{eff} * 10^{-10}$				
FBD+IR	FBD	همدما		همرفتی		
۵/۵ m/s	۵/۵ m/s	۳ m/s	۳ m/s	۳ m/s	۱/۵ m/s	سرعت هوا:
۰/۸۴۱ cm	۰/۸۴۱ cm	۰/۷ cm	۰/۷ cm	۱/۴ cm	۰/۷ cm	قطر نمونه:
دما (°C)						
۷/۹۵	۵/۲۹	-	-	-	-	۳۰
۸/۷۴	۷/۴۵	۵/۳۲	۴/۶۸	۴/۵۵	-	۴۰
۹/۸۷	۸/۷۲	۶/۹۳	۵/۸۷	۵/۹۵	۵/۹۴	۵۰
۱۱/۱	۱۰/۳	۹/۱۹	۸/۰۰	۸/۲۷	-	۶۰
۱۳/۲۵	۱۲/۹۴	۱۲/۷	۱۰/۲	۱۰/۷	۹/۶۹	۷۰

در درون ماده شده و در نتیجه ضریب نفوذ مؤثر و سرعت خشک شدن افزایش می‌یابد.

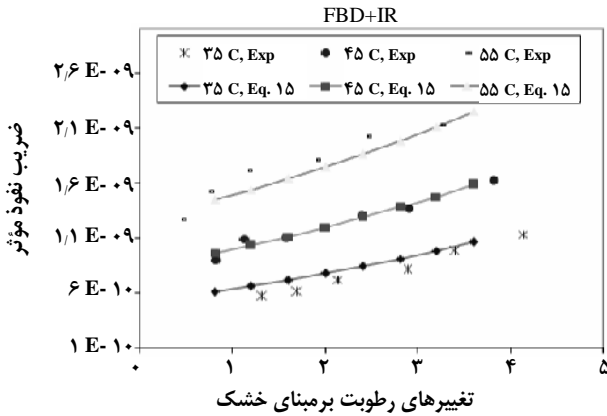
نتیجه گیری

نتیجه‌های تأثیر پارامترهای عملیاتی را بر میزان چروکیدگی نشان می‌دهد. میزان چروکیدگی تابع خطی از میزان رطوبت می‌باشد. در سیستم FBD سرعت خشک شدن کمتر، در نتیجه میزان چروکیدگی افزایش می‌یابد، در حالی که در سیستم FBD+IR با افزایش سرعت خشک شدن میزان چروکیدگی کاهش می‌یابد. این مطالعه نشان می‌دهد که دانسیته نمونه با میزان رطوبت یک تابع چند جمله‌ای است و با کاهش میزان رطوبت مقدار دانسیته کاهش می‌یابد.

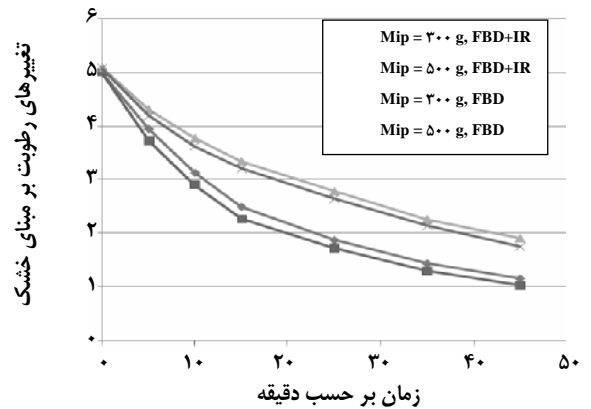
میزان ضریب نفوذ مؤثر به صورت روابط تجربی برای هر دو سیستم ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که دما تأثیر بسیار زیادی بر ضریب نفوذ مؤثر دارد در حالی که تأثیر میزان رطوبت در مرحله بعدی قرار دارد. افزایش دما و میزان رطوبت باعث

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مقایسه بین نتیجه‌های حاصل از روابط تجربی را با نتیجه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همانطوری که از این شکل‌ها نتیجه‌گیری می‌شود استفاده از منابع حرارتی مادون قرمز باعث افزایش ضریب نفوذ مؤثر می‌شود. میزان ضریب نفوذ مؤثر با خشک شدن ماده و کاهش مقدار رطوبت، کاهش می‌یابد در حالی که با افزایش دمای هوای ورودی مقدار آن افزایش می‌یابد. این مطالعه میزان انرژی اکتیواسیون برای سیستم FBD را برابر ۲۸/۵۱۷ و برای سیستم FBD+IR برابر ۲۵/۹۳ kJ/kg نشان می‌دهد. ترکیب امواج مادون قرمز باعث کاهش انرژی اکتیواسیون می‌گردد. میزان انرژی اکتیواسیون پیش‌بینی شده در مطالعه پژوهش‌گران گوناگون در جدول ۳ نمایش داده می‌شود.

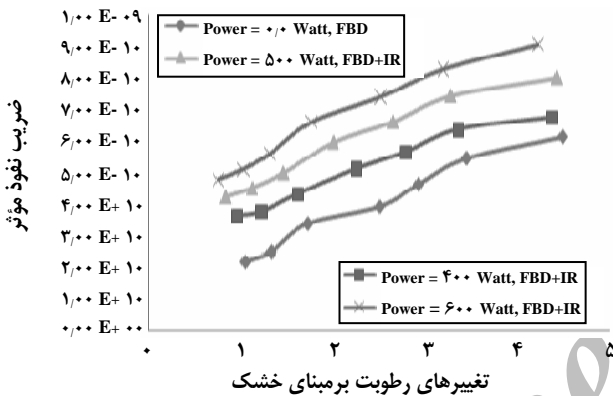
برای بررسی اثر توان مصرفی منابع حرارتی مادون قرمز تغییرهای میزان ضریب نفوذ مؤثر بر حسب میزان رطوبت در توان‌های گوناگون IR بررسی شده است. شکل ۱۷ نتیجه این مطالعه را نشان می‌دهد. همانطوری که در این شکل دیده می‌شود افزایش توان منابع حرارتی مادون قرمز باعث تولید گرمای بیشتر



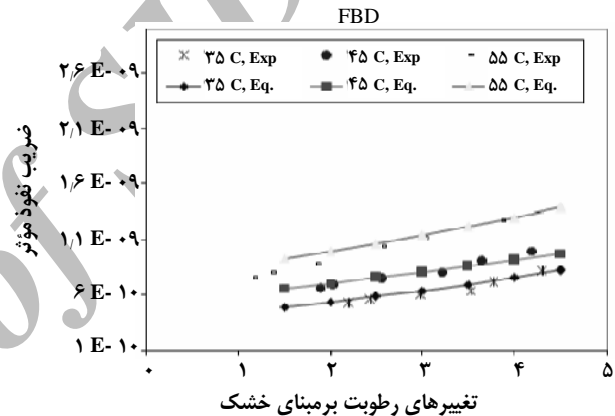
شکل ۱۶- تغییرهای ضریب نفوذ مؤثر بر حسب تغییرهای دما و رطوبت ماده خشک شونده برای بستر سیالی با ترکیب منبع مادون قرمز.



شکل ۱۴- تغییرهای رطوبت سیب زمینی در جرم‌های گوناگون ذره‌های خشی.



شکل ۱۷- تغییرهای ضریب نفوذ مؤثر بر حسب تغییرهای توان منبع گرمایی و رطوبت ماده خشک شونده برای بستر سیالی با ترکیب منبع مادون قرمز.



شکل ۱۵- تغییرهای ضریب نفوذ مؤثر بر حسب تغییرهای دما و رطوبت ماده خشک شونده برای بستر سیالی.

K_m	ضریب انتقال جرم (m/s)
L	طول ماده خشک شونده در هر لحظه (m)
MAE%	درصد میانگین متوسط خطا
MR	میزان رطوبت نسبی
$Q_{\text{sensible heat}}$	گرمای محسوس (kJ/kg)
$Q_{\text{latent heat}}$	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
Q_f	میزان گرمای متوسط حجمی (W/m^3)
r	شعاع ماده خشک شونده (m)
R_g	ثابت گازها
R_p	شعاع خارجی نمونه در حال خشک شدن (m)
t	زمان (s)
T_g	دمای هوا (K)
T_0	دمای اولیه نمونه (K)

افزایش ضریب نفوذ مؤثر می‌گردد. لذا ماده در حین خشک شدن با کاهش ضریب نفوذ مؤثر همراه است. میزان انرژی اکتیواسیون برای سیستم FBD برابر ۲۸/۵۱۷ و برای سیستم FBD + IR برابر ۲۵/۹۳ kJ/kg می‌باشد. ترکیب امواج مادون قرمز باعث کاهش میزان انرژی اکتیواسیون می‌گردد. افزایش توان منابع حرارتی IR باعث افزایش ضریب نفوذ مؤثر و سرعت خشک شدن می‌شود.

نمادها

A, B, a, b, c, d	ثابت‌های معادله‌های ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰
D	قطر ماده خشک شونده در هر لحظه (m)
D_0	ثابت معادله ضریب نفوذ مؤثر، معادله ۶
D_{eff}	ضریب نفوذ مؤثر (m^2/s)
E_a	انرژی فعال سازی (kJ/mol)

λ_n	عدد ثابت در معادله ۵ و برابر ۲،۴۰۴۸	V_0	حجم نمونه خشک شونده اولیه (m^3)
Δ	اختلاف کمیت	V	حجم نمونه خشک شونده در هر لحظه (m^3)
		X	رطوبت نمونه خشک شونده (kg moisture/ kg dry body)
		X_0	رطوبت اولیه نمونه خشک شونده (kg moisture/ kg dry body)
		X_e	رطوبت تعادلی نمونه خشک شونده (kg moisture/ kg dry body)
		Y_s	رطوبت مطلق هوا در سطح ماده
		Y_e	رطوبت مطلق تعادلی هوا

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از بنیاد ملی علوم ایران (INSF)، دانشگاه شیراز و دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت که با پشتیبانی مالی و فنی اجرای این تحقیق را فراهم آوردند تشکر و قدردانی می‌شود.

نمادهای یونانی

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶، ۲/۱ ، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸، ۱۰/۲۱	ρ_p	دانسیته ذره (kg/m^3)
--	----------	--------------------------

منابع

- [1] Izadifar M., Mowla D., Simulation of a Cross-Flow Continuous Fluidized Bed Dryer for Paddy Rice, *Journal of Food Engineering*, **58**, p. 325 (2003).
- [2] Wijitha S., Comparison of the Effects of Fixed Bed and Fluidized Bed Drying on Physical Properties Change of Spherical Food Material Using Peas as a Model Material, *ICFPTE'04* (2004).
- [3] Ratti C., Mujumdar A.S., "Handbook of Industrial Drying", 2nd Edition Revised and Expanded. Marcel Dekker Inc, New York: pp567-588 (1995).
- [4] Zhou S.J., Mowla D., Wang F.R., Rudolph V., Experimental Investigation of Good Drying Processes in Dense Phase Fluidized Bed with Energy Carrier, *CHEMECA 98*, port Doulas. North Queensland, Australia (1998).
- [5] Chen G., Yonghui-zhao., Yukun-chen J., Drying of Suspending Liquid in Fluidized Bed with Inert Particles, *Journal of Food Engineering*, **45**(4), p. 474 (1996).
- [6] Hatamipour M.S., Mowla D., Experimental and Theoretical Investigation of Drying of Carrots in a Fluidized Bed with Energy Carrier, *Drying Technology*, **21** (1), p. 83 (2003).
- [7] Sharma G.P., Verma R.C., Pathare P.B., Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Onion Slices, *Journal of Food Engineering*, **67**, p. 361 (2005).
- [8] Afzal M.T., Abe T., Hilida Y., Energy and Quality Aspect During Combined FIR-Convection Drying of Barely, *Journal of Food Engineering*, **42**, p. 177 (1999).
- [9] Abbasi B., Mowla D., Experimental and Theoretical Investigation of Drying Behavior of Garlic in an Inert Medium Fluidized Bed Assisted by Microwave, *Journal of Food Engineering*, **88**, p. 438 (2008).
- [10] Jumah R., Modeling and Simulation of Continuous and Intermittent Radio Frequency-Assisted Fluidized Bed Drying of Grains. Trans IchemE, part C, *Food and Bioproducts processing*, **83**(C3), p. 203 (2005).

- [11] Hatamipour M.S., Mowla D., Shrinkage of Carrots During Drying in an Inert Medium Fluidized Bed, *Journal of Food Engineering*, **55**, p. 247 (2002).
- [12] Hatamipour M.S., Mowla D., Correlations for Shrinkage Density and Diffusivity for Drying of Maize and Green Peas in a Fluidized Bed with Energy Carrier, *Journal of Food Engineering*, **59**, p. 221 (2003).
- [13] Hassini L., Azzouz S., Peczalski R., Belghith A., Estimation of Potato Moisture Diffusivity from Convective Drying with Correction for Shrinkage, *Journal of Food Engineering*, **76**, p. 47 (2007).
- [14] Abbasi B., Mowla D., Axial and Radial Moisture Diffusivity in Cylindrical Fresh Green Beans in a Fluidized Bed Dryer with Energy Carrier: Modelling with and Without Shrinkage, *Journal of Food Engineering*, **88**, p. 9 (2008).
- [15] Mulet A., Drying Modelling and Water Diffusivity in Carrots and Potatoes, *Journal of Food Engineering*, **22**, p. 329 (1994).
- [16] Crank J., "The Mathematics of Diffusion (2nd ed)", Clarendon press. Oxford (1975).
- [17] Park K.J., Diffusion Model with and Without Shrinkage During Salted Fish Muscle Drying, *Drying Technology*, **16**(3-5), p. 889 (1998).
- [18] McMin W.A.M., Magee, T.R.A., Physical Characteristics of Dehydrated Potatoes-Part I, *Journal of Food Engineering*, **33**, p. 37 (1997).
- [19] Jumah R.Y., Mujumdar A.S., Raghavan G.S.V., Batch Drying Kinetic of Corn in a Novel Rotating Jet Spouted Bed, *Can j Chem. Eng.*, **74**; p. 479 (1996).
- [20] Batik O.D., Marcotte M., Modeling the Moisture Diffusivity in a Baking Cake, *Journal of Food Engineering*, **56**, p. 27 (2002).
- [21] Srikiatden J., Roberts J.S., Measuring Moisture of Potato and Carrot (Core and Cortex) During Convective Hot air and Isothermal Drying, *Journal of Food Engineering*, **74**, p. 143 (2006).
- [22] Sablani S., Rahman S., Al-Habsi N., Moisture Diffusivity in Foods-An Overview, *In Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*; Mujumdar, A. S., Ed., Science Publishers, Inc.; USA, p. 35 (2000).