مطالعه عملي و نظري خشك شدن يك ذره‌ي استوانه‌اي در يک بسترسيالي حاوي ذره‌هاي حامل انرژي با كمك منابع حرارتي هواي داغ و زير قرمز

بيژن هنرور
تهران، دانشگاه آزاد اسلامي، واحد علوم و تحقيقات تهران، دانشكده مهندسي، گروه مهندسي شيمي

داريوش مولا+
شيراز، دانشگاه شيراز، دانشكده مهندسي شيمي، نفت و گاز

علي اكبر سيف كردي
تهران، دانشگاه صنعتي شريف، دانشكده مهندسي شيمي و نفت

چكيده: در اين مطالعه، خشک شدن يک ذره استوانه‌اي شكل در يک بستر سيالي حاوي ذره‌هاي خنثي با تركيب منبع حرارتي با امواج زير قرمز مورد مطالعه قرار گرفت. براي انجام آزمايش‌هاي گوناگون، يک دستگاه در مقياس پيشتاز طراحي و ساخته شد. از سيب زميني به عنوان ماده خشک شونده استفاده شد. يك مدل رياضي جهت مطالعه‌ي پديده‌هاي انتقال حرارت و جرم در ماده خشک شونده ارايه شد. اين مدل توانايي پيش بيني چگونگي توزيع ميزان رطوبت و دما را درون ماده خشك شونده داراست. نتيجه‌هاي حاصل از حل عددي مدل رياضي ارايه شده با نتيجه‌هاي اندازه‌گيري‌شده از دستگاه پيشتاز مقايسه و تطابق بسيار خوبي مشاهده شد. با استفاده از مدل ارايه شده اثر پارامترهاي متفاوت عملياتي از جمله توان منبع حرارتي زير قرمز بر سرعت خشک شدن ماده بررسي شد.

واژه‌هاي كليدي: خشك شدن، بستر سيالي، امواج زير قرمز ، ذره‌هاي حامل انرژي، سيب زميني.

KEY WORDS: *Drying, Fluidized bed, Infrared waves, Heat carrier particles, Potato.*

مقدمه

فرايند خشك شدن يكي از مهم‌ترين فرايندهاي انرژي‌بر در مهندسي شيمي است و در بيشتر فرايندهاي شيميايي، حداقل يك مرحله به اين فرايند اختصاص دارد. افزايش راندمان حرارتي در فرايند خشك شدن با توجه به قيمت بالاي انرژي و مشكلات زيست محيطي از اهميت فراواني برخوردار است. به كارگيري فناوري‌هـاي جديد از قبيل خشک كـردن بـا تركيب منابع حرارتي همرفتي و تابشي به منظور بالا بردن سرعت خشک شدن و افزايش ظرفيت خشک كن ها در كنار كاهش ضايعات، ضروري به‌نظر مي‌رسد [۲،۱].

خشك كردن به روش بستر شناور از جايگاه و اهميت ويژه‌اي برخوردار است. از اين روش براي خشك كردن مواد دانه‌اي شكل استفاده مي‌شـود. از مزاياي اين روش، اختلاط مناسب ذره‌هـاي و

*عهده دار مكاتبات
+E-mail: dmowla@shirazu.ac.ir

افزايش ضريب‌هاي انتقال حرارت و جرم بين دو فاز گاز و جامد است. *ايزديفر* و *همكاران* يک خشک‌کن بستر سيال ناپيوسته را مدل کردند. درمدل ارايه شده با استفاده از نظريه دو فازي بستر سيالي و اعمال قوانين بقاي جرم و انرژي معادلاتي که تغييرات رطوبت جامد و گاز را با زمان و طول بستر نشان دهند، به دست آمد [۳].

استفاده از ذره‌هاي خنثي به عنوان حامل انرژي در خشک کن‌هاي با بستر سيالي، در حال توسعه است. به طور مختصر مزاياي استفاده از اين ذره‌ها عبارتند از:

- بهبود ويژگي‌هاي شناوري ذره‌هاي خشک شونده در اثر کاهش حداقل سرعت سياليت
- يکنواختي دماي بستر و کاهش گرمايش موضعي ماده خشک شونده
- افزايش ضريب‌هاي انتقال حرارت و جرم

ذره‌هاي خنثي به‌دليل شناوري قادر به انتقال حرارت همرفتي هستند لذا باعث افزايش ضريب‌هاي کلي انتقال حرارت همرفتي مي‌شوند [۴].

يکي ديگر از روش‌هاي حرارت دهي به ماده خشک شونده، استفاده از امواج الکترومغناطيس مانند امواج زير قرمز، مايکروويو، دي الکتريک و راديو فرکانسي است اين نوع خشک کن‌ها از راندمان تابشي بالايي برخوردار هستند و براي خشک کردن مواد متخلخل در حال توسعه هستند. در صنايع غذايي ژاپن از اين نوع خشک کن‌ها براي خشک کردن جلبک، خزه دريايي، چاشني و هويج استفاده شده است [۵]. وقتي امواج الکترومغناطيس به سطح يک ماده برخورد مي‌کند به صورت حرکت الکتروني، لرزشي يا چرخش اتم‌ها و مولکول‌ها منجر به توليد انرژي مي‌شود. انواع مکانيسم‌هاي جذب انرژي ناشي از تابش امواج الکترومغناطيسي با توجه به محدوده‌ي طول موج‌هاي الکترومغناطيس تعيين مي‌شود. تغيير در حالت الکتروني مولکول‌ها به طول موج هاي بين μm (۰/۷-۰/۲) که در ناحيه امواج فرا بنفش و امواج مرئي قرار دارند، مربوط مي‌شود. در حالي‌که تغيير درحالت لرزشي اتم‌ها و مولکول‌ها در طول موج‌هاي بين μm (۱۰۰-۲/۵) مربوط به ناحيه زير قرمز و تغيير در حالت چرخشي اتم‌ها و مولکول‌ها به طول موج‌هاي بالاتر از μm ۱۰۰ به ناحيه امواج مايکروويو برمي‌گردد. تابش زير قرمز باعث لرزش مولکول‌ها و اتم‌ها شده که در اثر اصطکاک ناشي از لرزش آن‌ها گرما توليد مي شود [۶، ۷].

رنجان[۱] و *همكاران* در سال ۱۹۹۵ ميلادي در مدل‌سازي گرمايشي زير قرمز دانه‌هاي کشاورزي را خاکستري فرض کردند. عبارت انرژي تابشي درموازنه انتقال حرارت به عنوان يک عبارت مولد انرژي در معادله‌ي ديفرانسيل جزيي در نظر گرفته شد. شدت گرماي توليدي در واحد حجم نسبت به رطوبت ذره به صورت تابع نمايي کاهش يافت [۸].

ايسنگرد[۲] و *همكاران* در سال ۲۰۰۳ ميلادي آب موجود در فراورده‌هاي حاوي مقدارهاي زياد شکر را با استفاده از خشک کن زيرقرمز مطالعه کردند. تلفات جرم نه تنها آب را شامل مي‌شد بلکه ساير مواد فرار را نيز در بر مي‌گرفت [۹].

طغرل[۳] در سال ۲۰۰۶ ميلادي مدل مناسبي براي خشک‌شدن هويج ارايه کرد. در اين مطالعه ويژگي‌هاي خشک کن زير قرمز براي هويج در دماي ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتي گراد مطالعه شد. تأثير زياد دما بر سرعت خشک شدن مشهود بود به طوري که وقتي دماي خشک کن از ۵۰ به ۸۰ درجه برسد سرعت خشک شدن دو برابر شد [۱۰]. *شارما*[۴] و *همكاران* در سال ۲۰۰۵ ميلادي خشک کردن لايه‌هاي نازک پياز را با استفاده از امواج زير قرمز مطالعه کردند [۱۱]. *هبر*[۵] و *همكاران* در سال ۲۰۰۶ ميلادي استفاده از امواج زير قرمز و هواي گرم را براي خشک کردن سبزيجات مطالعه کردند. در اين مطالعه از سيستم چرخشي هواي گرم گذرا براي جابه‌جايي گرماي توليد شده استفاده شده است. با اين سامانه مي‌توان در دماي ۴۰ درجه، زمان خشک شدن را ۴۸ درصد کاهش داد. درضمن در اين روش، ۶۳ درصد انرژي کمتري مصرف مي‌شود [۱۲].

ترکيب دو مکانيسم انتقال حرارت همرفتي و تابشي از اهميت فراواني در افزايش راندمان حرارتي خشک‌کن‌ها برخوردار است. انتقال حرارت تشعشعي به محيط مادي نياز ندارد و فقط تابع ويژگي‌هاي تابشي ماده خشک شونده و منبع حرارتي است. فراورده‌هاي کشاوزي داراي ضريب جذب امواج تابشي در گستره‌ي ۰/۹ - ۰/۷ هستند. با تابش امواج زير قرمز به ماده خشک شونده ابتدا دماي داخلي ذره افزايش يافته سپس به علت تفاوت ميزان رطوبت، رطوبت از داخل ذره به روي سطح انتقال مي‌يابد و به وسيله‌ي هواي اطراف از روي سطح خارج مي‌شود [۱۳،۱۴].

(۱) Ranjan
(۲) Isengard
(۳) Tugrul
(۴) Sharma
(۵) Hebber

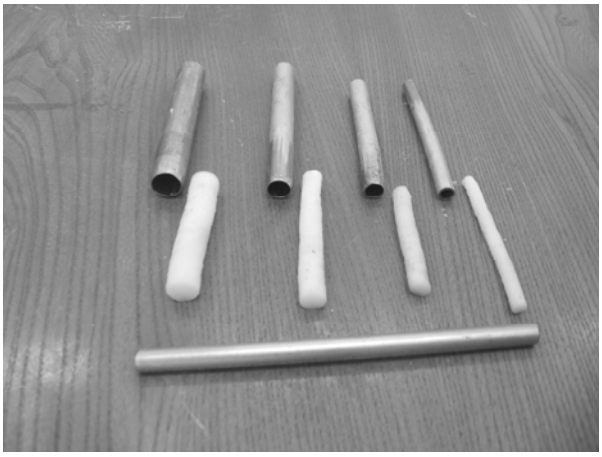
اگرچه پديده خشک شـدن در صنايع متفـاوت، بـا استفـاده از بسترهاي سيالي و يا به کمک امواج زير قرمز، به طور جداگانه مطالعاتي انجام گرفته است اما در مورد ترکيب منابع حرارتي و تابشي در بستر هاي سيالي پژوهش‌هاي زيادي انجام نشده است.

در اين پژوهش، مطالعاتي از نظر مدل‌سازي و ساخت يک نوع خشک کن بستر سيالي با دو منبع حرارتي هواي گرم و انرژي تابشي (زير قرمز) انجام گرفت. مدل رياضي انتقال حرارت و جرم براي يک ذره استوانه‌اي شکل ارايه و سپس جهت حل عددي مدل رياضي، يک برنامه کامپيوتري به زبان مطلب[1] ارايه شد. تأثير پارامترهاي متفاوت بر سرعت خشک شدن بررسي و تغييرات دماي ذره و ميزان رطوبت در آن نسبت به زمان محاسبه شد [۱۵].

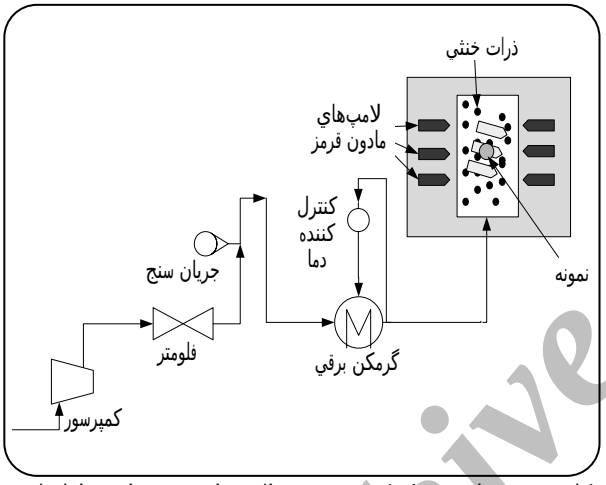
بخش تجربي

مواد

در اين پژوهش سيب‌زميني به‌عنوان ماده خشک شونده استوانه‌اي انتخاب و برشهاي استوانه‌اي سيب زميني با استفاده از قالب‌هاي فلزي که درون سيب‌زميني فرو برده مي‌شد به‌دست آمد. در اين مطالعه ازسه قالب با قطرهاي ۵/۶، ۸/۴ و ۹/۸ ميلي مترو طول‌هاي متفاوت استفاده شد. برش‌هاي سيب زميني در يک ظرف پلاستيکي سربسته در دماي۴ درجه سانتيگراد به مدت ۲۴ ساعت درون يخچال نگهداري شد تا به رطوبت تعادلي برسد. شکل ۱ قالب‌هاي فلزي و نمونه‌هاي سيب‌زميني را نشـان مي‌دهد. بـراي تعيين رطوبت اوليـه با استفاده از يک کوره الکتريکي نمونه‌هاي ماده خشک شونده در دماي ۱۰۵ °C کاملا خشک شدند و رطوبت اوليه براي سيب‌زميني در هنگام آزمايش حدود ۷۴ درصد بر مبناي مرطوب تعيين شد.



شکل ۱ـ قالب‌هاي فلزي مورد استفاده براي ايجاد سيب زميني به شکل استوانه‌اي.



شکل ۲ـ شماي خشک‌کن بستر سيالي حاوي ذره‌هاي حامل انرژي با ترکيب امواج زير قرمز.

دستگاه آزمايشگاهي

به منظور انجام آزمايش‌هاي مورد نظر، يک دستگاه خشک‌کن پيشتاز بستر سيالي با ترکيب با منابع حرارتي زير قرمز از جنس شيشه پيرکس ساخته شد. شماي خشک‌کن بستر سيالي و تصويـر دستگاه آزمايشگاهي در شکل‌هاي ۲ و ۳ نشان داده شده است. قطر داخلي دستگاه ۷۸ ميلي‌متر و طول آن ۶۰ سانتي‌متر بود. از گلوله‌هاي شيشه‌اي باقطر ۳ ميليمتر به عنوان ذره‌هاي خنثي با ويژگي‌هاي فيزيکي ($\rho_{Ip} = ۲۷۰۰$ kg/m، $k_{Ip} = ۰/۷۸$ W/m°C، $C_{P\,IP}=۰/۸۶$ kJ/kg°C) استفاده شد. هواي مورد نياز جهت خشک‌کردن به‌وسيله‌ي يک دستگاه کمپرسور با فشار بالا تامين و پس از گرفته‌شدن رطوبت و روغن احتمالي، فشار آن به‌وسيله‌ي تنظيم کننده فشار به حد

شکل ۳ـ دستگاه پيشتاز.

(۱) Mathlab

مورد نياز تقليل يافت. با ايجاد سوراخ‌هايي در يک صفحه دايره‌اي از جنس تفلون به ضخامت ۳cm و نصب آن در محل ورودي جريان هواي داغ، هوا به صورت يکنواخت به داخل بستر خشک کن هدايت شده و سرعت آن به‌وسيله‌ي يک دستگاه ديجيتال اندازه‌گيري و دماي آن به‌وسيله‌ي يک گرمکن الکتريکي که مجهز به سيستم کنترل دما مي‌باشد تا حد مورد نظر تنظيم شد.

از سه لامپ زير قرمز با توان ۲۵۰ وات با المنت تنگستن که در اطراف ستون پيرکس با فاصله ۷ تا ۹ سانتي متر(قابل تغيير) از مرکز ستون و با فاصله برابر (زاويه ۱۲۰ درجه) نسبت به يکديگر قرار داشتند، استفاده شد. توان الکتريکي منابع حرارتي زير قرمز با استفاده از يک دستگاه تنظيم کننده آمپر جريان، قابل کنترل بود.

روش‌هاي اندازه گيري

الف ـ اندازه گيري دما و جرم ذره

ماده خشک شونده به‌وسيله‌ي يک نخ نازک در داخل خشک کن آويزان‌شده و دماي مرکز و سطح آن به‌وسيله‌ي ترموکوپل اندازه‌گيري‌شد. تغييرهاي جرم در فاصله‌هاي زماني معلوم به‌وسيله‌ي يک ترازوي دقيق با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم (Radwag, Was ۲۲۰/C/۲) اندازه‌گيري شد. براي اندازه‌گيري ميزان رطوبت هوا از يک دستگاه رطوبت سنج الکترونيکي (Lutron, model: HT-۳۰۰۶) در ورود و خروج هوا استفاده شد. جمع آوري اطلاعات در حين آزمايش، با اندازه‌گيري جرم، دماي سطح و مرکز ذره، طول و قطر نمونه در فاصله‌هاي زماني مشخص انجام و تا خشک شدن نهايي جسم ادامه مي يابد.

در هر اندازه‌گيري از يک نمونه استفاده شده و در آزمايش بعدي از نمونه جديد استفاده شد. براي اندازه گيري دما از يک ترموکوپل ديجيتال (Lutron, + Pt ۱۰۰ + type K/J/R/E/T) استفاده شد. هر آزمايش جهت بالا بردن دقت اندازه‌گيري دو مرتبه تکرار شد. رطوبت متوسط اوليه جسم را با خشک کردن جرم مشخصي از جسم در آون با دماي ۱۰۵ °C به‌دست مي‌آمد. سرعت هوا با يک سرعت‌سنج ديجيتال با دقت اندازه گيري شد. براي اندازه‌گيري حجم نمونه خشک شونده، طول و قطر نمونه در نقاط متفاوت اندازه‌گيري شد. البته با غوطه‌ورسازي برش سيب‌زميني در محلول تولوئن نيز حجم آن اندازه‌گيري شد. متوسط توان حجمي گرماي توليد شده با امواج الکترومغناطيس به صورت آزمايشگاهي اندازه‌گيري شد.

ب ـ روش اندازه گيري گرماي زير قرمز

براي محاسبه گرماي بالا با قرار دادن آب و جوهر مرکب سياه در ظروف شيشه‌اي با ابعاد متفاوت استوانه‌اي شکل، متوسط گرماي توليدي در موقعيت‌هاي متفاوت بستر که در شکل ۴ نشان داده شده به عنوان گرماي توليد شده با مکانيسم زير قرمز اندازه‌گيري شدند که مقدارهاي آن در جدول ۱ نشان داده شده‌است. ويژگي‌هاي ترموفيزيکي ماده خشک شونده نيز در جدول ۲ ارايه شده است.

براي اندازه‌گيري Q_r از روش کالري‌متري استفاده شد براي اين منظور آزمايش‌هاي متعددي با قرار دادن يک ظرف استوانه‌اي از جنس شيشه پيرکس محتوي آب و يا جوهر مرکب سياه در مکان‌هاي مختلف بستر خشک کن مطابق شکل ۴ و اندازه‌گيري مقدار گرماي جذب شده در آن انجام شد. نمونه شيشه پيرکس مورد استفاده در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۶]. در فاصله‌هاي زماني مشخص ابتدا محتويات موجود در ظرف شيشه‌اي را خوب به‌هم زده شد تا دماي آن به پايين‌ترين دماي يکنواخت برسد و سپس دما اندازه‌گيري شد، با مقايسه دما در زمان‌هاي متفاوت مقدار گرماي محسوس جذب شده محاسبه مي‌شود. ميزان گرماي جذب شده در اثر تبخير نيز با اندازه‌گيري جرم کاهش يافته آب و مرکب سياه، قبل و بعد از استفاده از امواج زير قرمز و با اعمال گرماي نهان تبخير محاسبه مي‌شود. مقدار گرماي توليد شده در واحد حجم ماده خشک شونده از رابطه زير محاسبه مي‌شود.

$$Q_r = \frac{Q_{latent\ heat} + Q_{Sensible\ heat}}{V_p . \Delta t} \qquad (۱)$$

ضريب جذب را مي‌توان با تعيين نسبت گرماي جذب شده به‌وسيله‌ي سيب‌زميني با گرماي جذب‌شده به‌وسيله‌ي آب و جوهر سياه به‌دست آورد. براي اين منظور از مقادير گرماي جذب شده به‌وسيله‌ي سيب‌زميني، آب و جوهر سياه (جدول ۱) استفاده شد. مقدارهاي ضريب جذب متوسط سيب‌زميني نسبت به آب برابر ۰/۸۳۵۲ و نسبت به جوهر سياه برابر ۰/۸۳٤۹ است. همان‌طوري‌که مشاهده مي‌شود بين مقدارهاي ضريب جذب، آب و جوهر سياه تفاوتي وجود ندارد.

مدل سازي رياضي

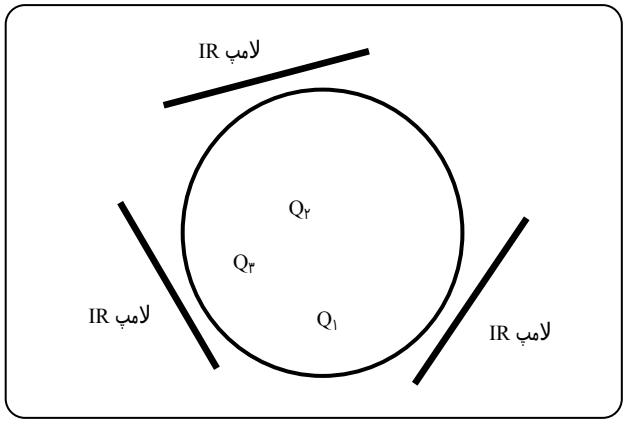
در مدل ارايه شده فرض مي‌شود که انتقال رطوبت با مکانيسم نفوذ مايع انجام مي‌گيرد و رطوبت از داخل ذره به فصل مشترک انتقال يافته و تبخير در فصل مشترک اتفاق مي‌افتد. فرضيه‌هاي مورد استفاده در ارايه مدل عبارت‌اند از:

جدول ۱ـ توان گرمايي توليدي (W/m^3) در دماهاي متفاوت براي ماده خشک شونده در موقعيت هاي متفاوت.

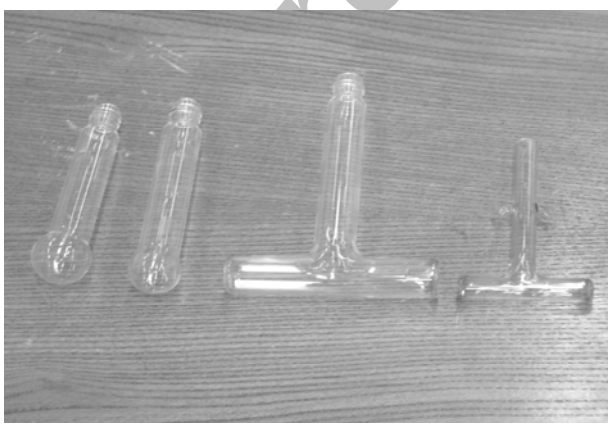
T=۳۵ °C						
اندازه	Dia= ۱۴/۹۲ mm L= ۷۷/۳۶ mm			Dia= ۸/۹۲ mm L= ۴۹/۲۰ mm		
موقعيت	سيب زميني	آب	جوهر سياه	سيب زميني	آب	جوهر سياه
Q_1	۱/۷۵ × ۱۰^۶	۲/۱۰ × ۱۰^۶	۲/۱۵ × ۱۰^۶	۱/۴۸ × ۱۰^۶	۱/۷۹ × ۱۰^۶	۱/۷۸ × ۱۰^۶
Q_2	۱/۹۰ × ۱۰^۶	۲/۳۰ × ۱۰^۵	۲/۳۰ × ۱۰^۵	۱/۵۲ × ۱۰^۶	۱/۸۱ × ۱۰^۶	۱/۸ × ۱۰^۶
Q_3	۱/۹۵ × ۱۰^۶	۲/۳۳ × ۱۰^۶	۲/۳۲ × ۱۰^۶	۱/۵۶ × ۱۰^۶	۱/۸۸ × ۱۰^۶	۱/۸۷ × ۱۰^۶
T=۶۰ °C						
اندازه	Dia= ۱۴/۹۲ mm L= ۷۷/۳۶ mm			Dia= ۸/۹۲ mm L= ۴۹/۲۰ mm		
موقعيت	سيب زميني	آب	جوهر سياه	سيب زميني	آب	جوهر سياه
Q_1	۲/۴۱ × ۱۰^۶	۲/۹ × ۱۰^۶	۲/۹۱ × ۱۰^۶	۱/۹۴ × ۱۰^۶	۲/۳۲ × ۱۰^۶	۲/۱۹ × ۱۰^۶
Q_2	۲/۶۶ × ۱۰^۶	۳/۲ × ۱۰^۶	۳/۲۱ × ۱۰^۶	۱/۹۶ × ۱۰^۶	۲/۳۷ × ۱۰^۶	۲/۳۸ × ۱۰^۶
Q_3	۲/۸۴ × ۱۰^۶	۳/۴ × ۱۰^۵	۳/۳۹ × ۱۰	۲/۰۷ × ۱۰^۶	۲/۴۹ × ۱۰^۶	۲/۵۰ × ۱۰^۶

جدول ۲ـ ويژگي‌هاي ترمو فيزيکي و انتقالي سيب زميني.

خاصيت	توضيحات	مرجع
C_P	۴/۱۹X′/۱۰۰+۰/۸٤(۱۰۰-X′)/۱۰۰	ASHAR guide and Data book
K p(j/m.s)	K p=۰/۵۵X′/۱۰۰+۰/۲٦(۱۰۰-X′)/۱۰۰	R.L.Earle (unit Operations in food processing above freezing page)
λp(kj/kg)	λp=۳۳۵X′/۱۰۰	R.L.Earle (unit Operations in food processing above freezing page)
A_w	A_w=۳/۰۰۰۱X_m+۰/۰۹۹۹;(X_m<۰/۲) A_w= -۰/۵۱۲۹۴۶۴۹۸۱۵۹۹۲X_m^2+۰/۶۳۹۸۱۳۰۲۵۱۰۱۰۹ X_m +۰/۵۹۹٤۸۲۸۹۵۵۹۰٤۱;(۰/۲≤X_m≤۰/٦) A_w= ۰/۰۵۸۴X_m+ ۰/۷۶۶۷;(X_m>۰/٦)	Chou et al
H_w(kj/kg)	H_w =۲۰۶۷۶۷۱۹۱۱۴۲E۱۰^٦X_m^4+ ٤/۰۰۰۳۲۷۷۹۷۲۰۲۷۱E۱۰^٦X_m^3 -۱۶۱۳۹۶۴۱۶۰۸۳۸E۱۰^۵X_m^2+ ۲/۳۶۸۱۸۷۶۴۵۶۸۸E۱۰^٤X_m +۱۶۳۰۸۳۳۳۳۳۳ E۱۰^۳;(۰/۱ ≤X_m≤۰/۲)	Keey



شکل ۴ـ موقعيت‌هاي متفاوت جهت اندازه‌گيري توان گرمايي توليد شده در بستر.



شکل ۵ـ نمونه کوارتز در مختصات استوانه‌اي و کروي جهت اندازه‌گيري توان حرارتي حجمي توليد شده در اثر امواج زير قرمز.

- انتقال رطوبت و حرارت فقط در یک بعد انجام می‌شود.
- هیچ واکنش شیمیایی در حین خشک شدن اتفاق نمی‌افتد.
- هوا به صورت یکنواخت در ستون خشک‌کن توزیع می‌شود.
- هوا و شیشه پیرکس امواج الکترومغناطیس را از خود عبور می‌دهند.
- ماده خشک شونده یک جسم خاکستری در نظر گرفته می‌شود.

این مدل برای یک سیستم استوانه ای ارایه می‌شود و ماده خشک شونده دارای قطر d_p و طول L_p است و در آن $L_p/d_{p>5}$ است و لذا با فرض یک بعدی بودن انتقال حرارت و جرم مطابقت دارد. دما و میزان رطوبت اولیه ماده خشک شونده در قسمت‌های متفاوت ماده یکنواخت و به ترتیب برابر T_0 و X_0 است [۸، ۹].

معادله‌ی بقای جرم

با نوشتن معادله انتقال جرم برای یک جزء حجمی درون ماده خشک شونده با مختصات استوانه‌ای با ضخامت dr و ساده‌سازی ریاضی معادله دیفرانسیلی بقای جرم به صورت زیر در می‌آید:

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

شرایط اولیه و مرزی برای این معادله عبارت‌اند از :

$$\text{at} \quad t=0 \quad 0<r<R_P \quad X=X \qquad (۳)$$

$$\text{at} \quad t>0 \quad r=0 \quad \frac{\partial X}{\partial r}=0$$

$$\text{at} \quad t>0 \quad r=R_P \quad D_{eff}\frac{\partial X}{\partial r}=k_m(Y_s-Y_e)$$

میزان رطوبت متوسط در ماده خشک شونده در هر زمان با استفاده از معادله زیر حاصل می‌شود.

$$X_{avg}(t)=\frac{3\mu}{v_p}\int_0^R r^2 X(r,t)dr \qquad (٤)$$

با استفاده از رابطه‌ی تجربی زیر، ضریب انتقال جرم محاسبه می‌شود[۱۷].

$$Sh=\frac{k_m L}{D_{eff}}=0.692\,Re^{0.514}\,Sc^{0.333} \qquad (۵)$$

معادله بقای انرژی

با نوشتن معادله بقای انرژی برای یک جزء حجمی در جسم استوانه‌ای مورد نظر و با انجام عملیات ریاضی، معادله دیفرانسیلی بقای انرژی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial(\rho_p C_{pg} T_p)}{\partial t}=\frac{1}{r}\left[\frac{\partial(rk_p)}{\partial r}\frac{\partial T_p}{\partial r}\right]+Q_r \qquad (۶)$$

در این رابطه‌ی Q_r مقدار گرمای جذب شده در واحد حجم جسم خشک شونده از امواج زیر قرمز است که روش تعیین آن در پیش توضیح داده شده است.

شرایط اولیه و مرزی عبارت‌اند از:

$$t=0 \qquad 0<r<R_P \qquad T=T_0 \qquad (۷)$$

$$t>0 \qquad r=0 \qquad \frac{\partial T_P}{\partial r}=0$$

$$\pm k_P A_P\frac{\partial T_P}{\partial r}=h_t A_P(T_g-T_P)+k_m(Y_e-Y_\infty)\Delta H^{evp}$$

در معادله‌ی (۵) در شرایطی که فقط از هوای داغ استفاده شده، و دمای سطح ذره از دمای داخل آن بزرگتر است، علامت منفی به کار می‌رود اما در شرایط حالت ترکیبی، زمانی‌که دمای داخل ذره بزرگتر از سطح آن شود، از علامت مثبت استفاده می‌شود. متوسط حجمی دما در ماده خشک شونده با استفاده از معادله‌ی زیر حاصل می‌شود.

$$T_{avg}(t)=\frac{3\pi}{V_p}\int_0^R r^2 T(r,T)dr \qquad (۸)$$

مجموعه معادله‌های (۲) تا (۸) مدل ریاضی حاکم بر خشک‌شدن ذره‌های در این نوع خشک کن را نشان می‌دهد. حل همزمان این معادله‌ها به همراه شرایط مرزی مناسب، تغییرهای رطوبت و دما را در ماده خشک شونده ارایه می‌دهد.

ضریب کلی انتقال حرارت جابه‌جایی h_t برای مواد غوطه‌ور در بستر سیالی با استفاده از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید [۱۸].

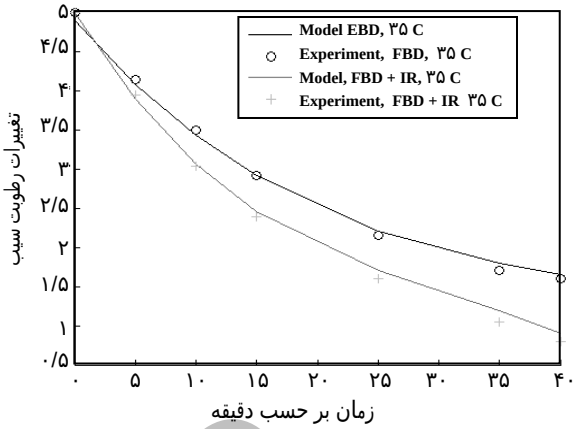
$$Nu=\frac{hl}{K_g}=0.341\,Ar^{0.314}\,Re^{0.064} \qquad (۹)$$

که Re و Ar در بستر سیالی به صورت زیر تعریف می‌شود.

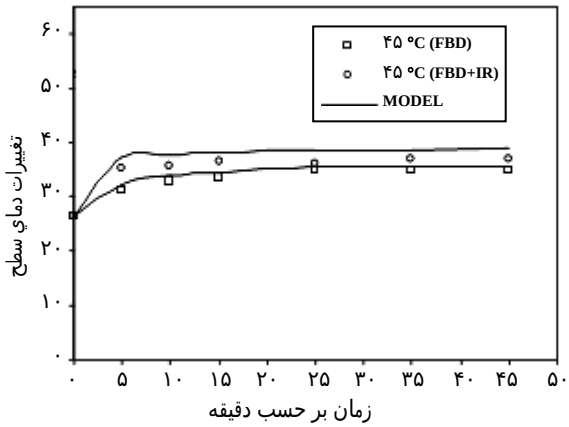
$$Ar=\frac{g d_p^3(\rho_p-\rho_g)\rho_g}{\mu_g^2} \qquad Re=\frac{\rho_g V d_p}{\mu_g}$$

محاسبه گرمای زیر قرمز

در این مطالعه چون جسم خشک شونده به‌طور کامل به‌وسیله‌ی



شكل۶ـ مقايسه‌ي نتيجه‌هاي مدل ارايه شده با نتيجه‌هاي اندازه‌گيري شده براي تغييرهاي رطوبت ماده بر حسب زمان



شكل۷ـ مقايسه‌ي نتيجه‌هاي مدل ارايه شده با نتيجه‌هاي اندازه گيري شده براي تغييرهاي دماي سطح ذره نسبت به زمان.

منبع حرارتي زير قرمز ديده مي‌شود لذا ضريب شكل آن يک است. مقدار گرماي تابشي انتقال يافته به سطح نمونه از معادله‌ي زير محاسبه مي شود.

$$Q_{abs} = \frac{\partial(T_i^4 - T_j^4}{\left(\frac{P_i}{\varepsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{P_j}{\varepsilon_j A_j}\right)} \qquad (10)$$

مقدار گرماي توليد شده در واحد حجم در داخل ماده خشک‌شونده در جهت شعاعي براي مختصات استوانه اي با استفاده از معادله لامبرت به‌شرح زير محاسبه مي‌شود.

$$Q_r = \frac{Q_{Abs}\exp(-k(R_p - r))}{V_P} \qquad (11)$$

ضريب ميرايي (k) بيان كننده نفوذ امواج زير قرمز به‌درون نمونه خشک‌شونده است و عكس ضريب ميرايي عمق نفوذ ناميده مي‌شود. ضريب ميرايي كوچكتر به مفهوم عمق نفوذ بيشتر و نشانگر ميزان ميرايي كندتر فلاكس تابشي است. ضريب ميرايي، خاصيتي از ماده است كه به تركيب شيميايي ماده، پارامترهايي شيمي و فيزيكي حالت ماده و به طول موج تابش بستگي دارد [۱۹]. مقدار گرماي Q_r را مي‌توان با استفاده از نتيجه‌هاي حاصل از اندازه‌گيري آن كه در بخش روش‌هاي اندازه‌گيري ارايه شد، محاسبه كرد.

حل مدل رياضي

براي حل مدل رياضي پيشنهادي، مي‌بايست معادله‌هاي (۲) و (٦) به‌صورت همزمان و اعمال شرايط اوليه و مرزي ارايه شده حل شوند. حل اين معادله‌هاي توانايي محاسبه و پيش‌بيني پروفيل تغييرهاي دما و رطوبت ماده خشک شونده را نسبت به زمان دارد. روش تفاضل محدود كرانک ـ نيكلسون براي حل عددي معادله‌هاي بالا با استفاده از تغييرهاي دما و رطوبت به‌صورت تابعي از زمان به‌كار گرفته شد.

نتيجه‌ها و بحث

براي تأييد اعتبار مدل پيشنهادي، نتيجه‌هاي حاصل از مدل در محاسبه ميزان تغييرهاي رطوبت متوسط و دماي سطح خشک‌شونده با نتايج اندازه‌گيري شده در دستگاه پيشتاز مقايسه شدند. شكل‌هاي ۶ و ۷ نتيجه اين مقايسه‌ها را نشان مي‌دهند. آزمايش‌هاي براي حالت‌هاي بستر سيالي(FBD) و بستر سيالي با تركيب امواج زير قرمز (FBD With IR) انجام شد. براي تعيين ميزان رطوبت متوسط ماده خشک شونده با اندازه‌گيري جرم ماده نسبت به زمان و با در نظر گرفتن جرم ماده خشک، ميزان رطوبت حاصل شد. شكل ۶ نشانگر مقايسه بين رطوبت تعيين شده از اندازه‌گيري جرم در آزمايش در زمان‌هاي متفاوت ومقايسه آن با ميزان رطوبت متوسط كه به‌وسيله‌ي معادله (۱) محاسبه شده‌است. در اين نمودار روند ميزان رطوبت حاصل از دستگاه آزمايشگاهي و پيش‌بيني مدل‌رياضي به‌صورت يک منحني نزولي نشان داده شده‌است كه اين موضوع نشانگر خشک شدن مواد نم‌گير[1] در منطقه نزولي سرعت‌است. در مرحله‌هاي خشک‌شدن اوليه مقدارهاي رطوبت متوسط پيش‌بيني شده همخواني خوبي با داده‌هاي آزمايشگاهي دارند، شكل ۷ نشانگر مقايسه‌ي بين دماي اندازه‌گيري‌شده در زمان‌هاي متفاوت و دماي سطح محاسبه‌شده به‌وسيله‌ي مدل است.

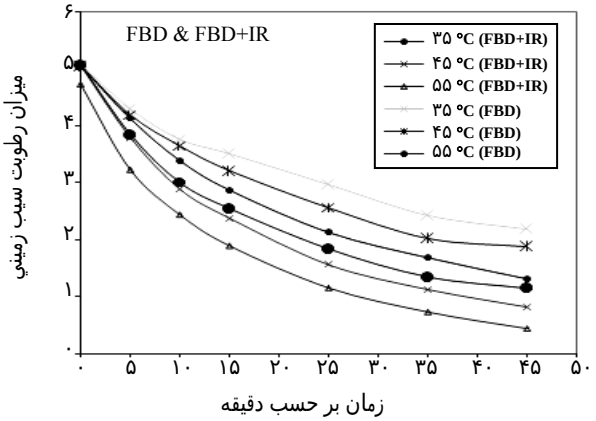
(۱) Hygroscopic

مدل پيشنهادي برآورد بيشتري براي ميزان دماي ماده خشک شونده نشان مي‌دهد. اين تخمين بالاتر به فرضيه‌ها و ميزان رطوبت تعادلي مورد استفاده در مدل که ممکن‌است با مقدار رطوبت تعادلي سيب‌زميني در آزمايشگاه به علت تفاوت در جنس آن (وابسته به محل کاشت و شرايط بذر و غيره)، متفاوت باشد، بستگي دارد. هم‌چنين در بستر سيالي با ترکيب امواج زير قرمز تغيير يا انحراف که در برآورد توزيع دما در طي خشک شدن اتفاق افتاده به علت استفاده از قانون لامبرت است، که علت آن وابستگي جذب امواج زير قرمز به صورت تابعي از ميزان رطوبت ماده خشک شونده، است. بايد توجه کرد که معادله‌هاي جرم و انرژي به هم وابسته هستند. ضريب نفوذ رطوبت موثر D_{eff} در مدل انتقال جرم تابعي از دما است.

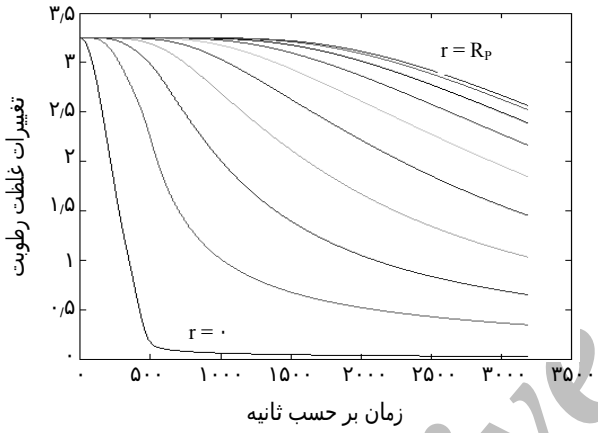
محاسبه دما در روي سطح و مرکز ماده خشک شونده و مقايسه آن با نتيجه‌هاي اندازه‌گيري نشان مي‌دهد که مدل دماي بيشتري را محاسبه مي‌کند. اين افزايش در محاسبه‌هاي دما به فرضيه‌هاي مدل ارتباط دارد که بستگي به عمق نفوذ امواج زير قرمز به درون ماده و ويژگي‌هاي جذب ماده خشک شونده و برآورد انرژي توليد شده در ماده خشک شونده مربوط مي‌شود. چون معادله‌هاي انرژي و جرم مستقل نيستند لذا افزايش در محاسبه دما به‌وسيله‌ي مدل نسبت به نتيجه‌هاي اندازه‌گيري، منجر به برآورد ميزان رطوبت کمتر در منحني خشک شدن در پايان خشک شدن مي‌شود. هم چنين مقدارهاي رطوبت تعادلي در شرايط مرزي ممکن است داراي خطا باشند.

با توجه به اعتبار مدل پيشنهادي ، مدل قادر به محاسبه توزيع دما و رطوبت در داخل نمونه سيب زميني در شرايط متفاوت عملياتي است. شکل ۸ منحني خشک شدن نمونه‌هاي سيب زميني را در دماهاي متفاوت در يک بستر سيالي با ذره‌هاي حامل انرژي با و بدون استفاده از ترکيب منابع حرارتي زير قرمز را نشان مي‌دهد. همان‌طوري‌که مشاهده مي‌شود، با افزايش دما در هر دو حالت، سرعت خشک شدن افزايش مي‌يابد.

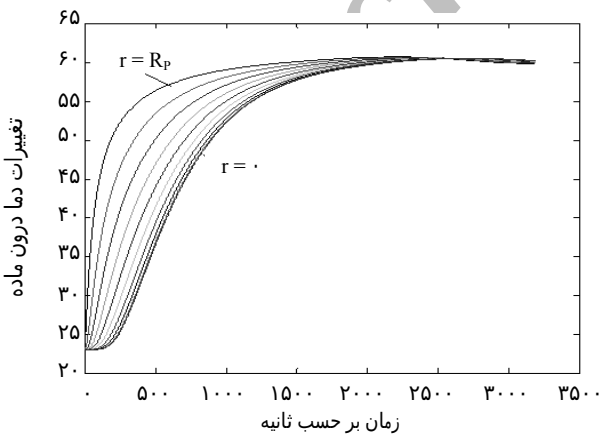
تغييرهاي دما و رطوبت در نمونه‌هاي سيب‌زميني در شرايط عملياتي بدون استفاده از امواج زيرقرمز (شکل‌هاي ۹ و ۱۰) در بستر سيالي حاوي ذره‌هاي حامل انرژي نشان مي‌دهد که نقطه مرکزي نمونه‌ها بيشترين ميزان رطوبت و سطح خارجي کمترين رطوبت را داراست اما دماي نقطه مرکزي کمتر از دماي لايه‌خارجي است. دماي سطح ذره در حداکثر مقدار خود مي‌تواند به دماي هواي داغ برسد. هم‌چنين مشاهده مي‌شود که رطوبت در سطح ذره به مقدار نهايي خود در شرايط تعادل با هواي اطراف خواهد رسيد.



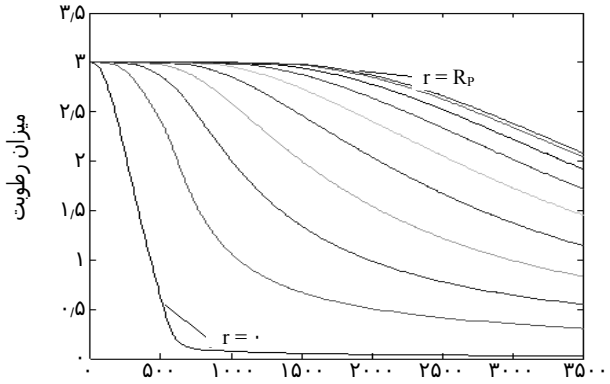
شکل ۸ ـ منحني خشک شدن ماده خشک شونده در دماهاي متفاوت در بستر سيالي با و بدون ترکيب با منبع حرارتي زير قرمز.



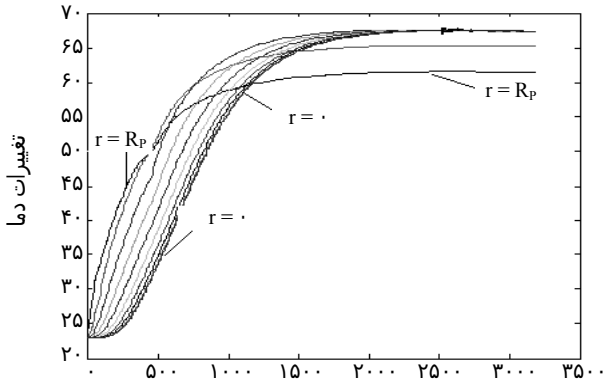
شکل ۹ـ تغييرهاي رطوبت نسبت به زمان در شعاع‌هاي متفاوت ماده خشک شونده در دماي ۶۰ °C و سرعت ۶m/s در بستر سيالي (قطر سيب زميني، **dia=0.984 cm**).



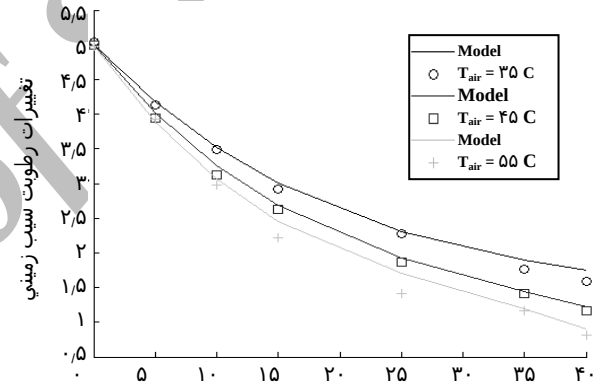
شکل ۱۰ـ تغييرهاي دما نسبت به زمان در شعاع‌هاي متفاوت ماده خشک شونده در دماي ۶۰ °C و سرعت ۶m/s در بستر سيالي (قطر سيب زميني، **dia=0.984 cm**).



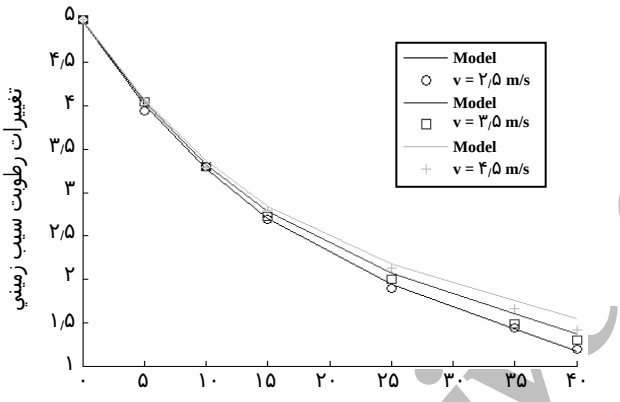
شکل ۱۱ـ تغییرهاي رطوبت نسبت به زمان در شعاع‌هاي متفاوت ماده خشک شونده در دمـاي **C ° ۶۰** و سـرعت **۶m/s** در بـستر سـیالي با ترکیب منبع حرارتي زیر قرمز (قطر سیب زمیني، **dia = ۰/۹۸۴ cm**).



شکل۱۲ـ توزیع دما سیبزمیني در طي خشک‌شدن در دماي **C ° ۶۰** و سرعت **۶m/s** در بستر سیالي با ترکیب منبع حرارتي زیر قرمز (قطر سیب زمیني، **dia = ۰/۹۸۴ cm**).



شکل ۱۳ـ منحني خشک شدن ماده خشک شونده در دماهاي متفاوت در بستر سیالي با ترکیب با منبع حرارتي زیر قرمز.

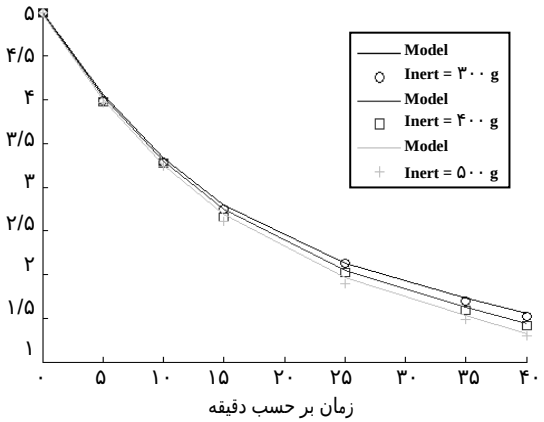


شکل ۱۴ـ منحني خشک شدن ماده خشک شـونده در سـرعت‌هـاي متفاوت در بستر سیالي با ترکیب با منبع حرارتي زیر قرمز.

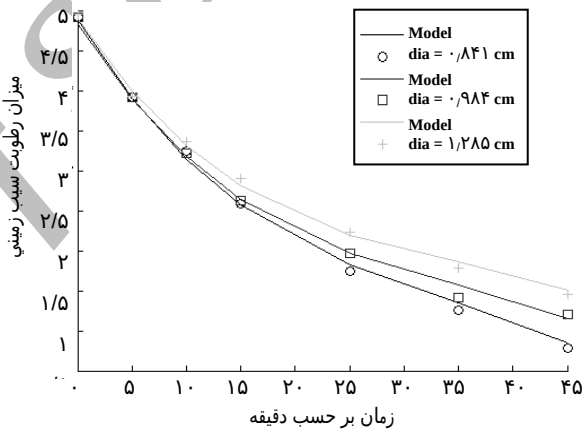
اما در سامانه‌ي ترکیبي هواي داغ و امواج زیر قرمز (شکل‌هاي ۱۱ و ۱۲) منحني تغییرهاي دما و رطوبت نشان مي‌دهد که از نظر مقدار رطوبت شرایط مانند حالت پیش است و فقط سرعت خشک‌شدن افزایش یافته و از نظر دمایي نقطه مرکزي داراي بیشترین دما و لایه بیروني کمترین دما را داراست بنابراین، حرارت و رطوبت از داخل ذره به بیرون انتقال مي‌یابد. در واقع چون امواج الکترومغناطیس در رطوبت‌هاي بالاتر بیشتر جذب مي‌شوند دما در داخل ذره افزایش مي‌یابد. مقایسه نتیجه‌هاي پیش بیني مدل بیان مي‌دارد که دماي نمونه‌ها در مقایسه با فرایند خشک‌کن همرفتي با سرعت بیشتري افزایش مي یابد.

در طي این دوره انرژي جذب شده به‌وسیله‌ي نمونه از امواج زیـر قرمز و هواي داغ در بستر سیالي بزرگتـر از انرژي تلف شـده به علت تبخیر رطوبت است و لذا سطح به دلیل جریان همرفتي سرد مي‌شود.

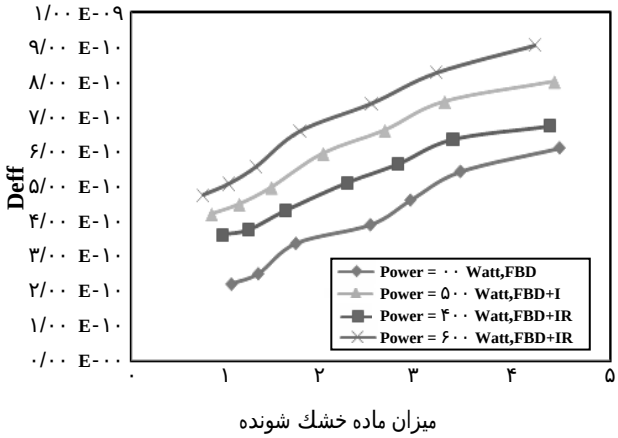
تاثیر پارامترهاي عملیاتي بر سرعت خشک شدن در شکل‌هاي ۱۳ تا ۱۶ نشان داده شـده است. نتیجه‌ها نشـان مي‌دهـد کـه در سامانة ترکیبي با افزایش دما و جرم ذره‌هاي خنثي و با کاهش سرعت هوا و قطر نمونه خشک شونده، سرعت خشک شدن افزایش مي‌یابد. در شکل ۱۳ افزایش دما باعث مي‌شود که انرژي بیشتري به ماده وارد شود. استفاده از حرارت‌دهي زیر قرمز دماي داخلي نمونه را افزایش داده و حرارت از داخل ذره به سطح منتقل مي‌شود، در این شرایط دماي سطح ذره افزایش یافته و انتقال حرارت از سطح بـه هوا باعث اتلاف حرارت مي‌شـود. کاهش قطر



شكل ۱۵ـ منحني خشک شدن ماده خشک شونده در جرم‌هاي متفاوت ذره‌هاي خنثي در بستر سيالي با تركيب با منبع حرارتي زير قرمز.



شكل ۱۶ـ منحني خشک شدن ماده خشک شونده درقطرهاي متفاوت ماده خشک شونده در بستر سيالي با تركيب با منبع حرارتي زير قرمز.



شكل ۱۷ـ منحني تغييرهاي ضريب نفوذ موثر بر حسب رطوبت ماده در توان هاي متفاوت زير قرمز.

نمونه در شكل ۱۴ باعث كاهش مقاومت انتقال حرارت هدايتي شده لذا سرعت خشک شدن افزايش مي‌يابد. نتيجه‌ها نشان مي‌دهد كه با افزايش اندازه ماده خشک شونده، توان حجمي گرمايي بيشتري به وسيله‌ي نمونه جذب مي‌شود اما چون نمونه‌هاي كوچكتر مقاومت كمتري در برابر انتقال جرم دارند، لذا نمونه كوچكتر بـا سرعت بيشتـري نسبت بـه نمونـه بزرگتـر خشک مي‌شـود. در شكل ۱۵ با افزايش جرم ذره‌هاي خنثي ضريب انتقال حرارت همرفتي و سرعت خشک شدن افزايش مي‌يابد.

با تغيير افزايشي سرعت هوا مطابق شكل ۱۶ تلفات حرارتي افزايش يافته لذا سرعت خشک‌شدن كاهش مي‌يابد. تلفات حرارتي به علت دماي بيشتر در درون ماده كه تابش زير قرمز ايجاد نموده، اتفاق مي‌افتد.

تغييرهاي ضريب نفوذ برحسب ميزان رطوبت در توان‌هاي مختلف منبع حرارتـي زيـر قرمز در شكل ۱۷ نشـان داده شـده است. همان طوري كه مشاهده مي‌شود، با افزايش توان منبع حرارتي در رطوبت ثابت ضريب نفوذ افزايش مي‌يابد در حالي كه در توان ثابت با كاهش رطوبت، ضريب نفوذ نيز كاهش مي‌يابد.

نتيجه گيري

در اين مطالعه، خشک شدن يک نمونه استوانه‌اي از سيب زميني در بستر سيالي حاوي ذره‌هاي حامل انرژي با تركيب امواج زير قرمز مورد بررسي قرار گرفت. داده‌هاي آزمايشگاهي با استفاده از دستگاه پيشتاز كه براي همين منظور طراحي و ساخته شد، اندازه‌گيري و ثبت شد. يک مـدل رياضي در حالت ناپايـدار ارايـه و معادله‌هاي همزمـان انتقال حرارت وجرم با استفاده از روش تفاضل محدود حل شـد. نتيجه‌هاي حاصل از مدل نشان داد كه تابش امواج زير قرمز در رطوبت‌هاي بيشتر ماده موثرتر است، و بيشتر جذب مي‌شود. تطابق خوبي بين مدل رياضي ارايه شده و نتيجه‌هاي آزمايشگاهي مشاهده شد و لذا مدل قادر به پيش بيني پروفيل دما و رطوبت درون ماده است. اثر پارامترهاي متفاوت مانند دما و سرعت هوا، جرم ذره‌هاي خنثي و اندازه‌ي ذره‌ي مورد بررسي قرار گرفت.

نتيجه‌ها نشان داد كه افزايش دما و كاهش سرعت هوا، افزايش جرم ذره‌هاي خنثي و كاهش اندازه‌ي ماده خشک شونده باعث افزايش سرعت خشک شدن مي‌شود. مقدار ضريب نفوذ با افزايش توان منبع حرارتي افزايش يافته در حالي‌كه با كاهش رطوبت ماده اين مقدار كاهش مي‌يابد.

فهرست علايم

سطح جانبي (m^2)	A
سطح جانبي (m^2)	A_p
ضريب فعاليت آب	A_w
گرماي ويژه (J/kg °C)	C_p
گرماي ويژه گاز (J/kg °C)	C_{pg}
قطر ذره (m)	d_p
ضريب نفوذ مؤثر (m^2/s)	D_{eff}
ضريب انتقال حرارت ($W/m^2°C$)	h_t
انتالپي تبخير آب (kJ/kg)	H_w
گرماي نهان تبخير (kJ/kg)	ΔH^{evp}
ضريب انتقال جرم (m/s)	K_m
ضريب رساناي حرارتي ذره (kJ/ms °C)	k_p
ضريب انتقال جرم (kg/m^2s)	k_y
طول (m)	L
طول ذره (m)	L_p
نرخ انتقال حرارت (W)	Q
گرماي تبخير (kJ/kg)	Q_{latent}
گرماي محسوس (kJ/kg)	$Q_{sensible}$
ميزان گرماي متوسط حجمي (W/m^3)	Q_r
شعاع (m)	r
شعاع خارجي ذره‌ي جامد در حال خشك شدن (m)	R_p
زمان (s)	t
دما (K)	T
دماي هوا (K)	T_g
دماي اوليه ذره (K)	T_0
دماي ذره (K)	T_p
دماي توده (K)	$T\infty$
دماي متوسط نمونه (K)	T_{avg}
حجم نمونه (m^3)	V_p
رطوبت ذره (kg moisture/ kg dry body)	X
رطوبت ذره بر مبناي تر (kg moisture/ kg wet body)	X′
رطوبت متوسط ذره (kg moisture/ kg dry body)	X_{avg}
رطوبت متوسط ذره (kg moisture/ kg dry body)	X_m
رطوبت اوليه ذره (kg moisture/ kg dry body)	X_0
رطوبت تعادلي ذره (kg moisture/ kg dry body)	X_e
رطوبت مطلق هوا در سطح ذره (kg moisture/ kg dry air)	Y_s
رطوبت توده هوا (kg moisture/ kg dry air)	Y_∞
رطوبت مطلق تعادلي هوا (kg moisture/ kg dry air)	Y_e

علايم يوناني

چگالي ذره (kg/m^3)	ρ_p
چگالي (kg/m^3)	ρ
گرماي نهان تبخير (kJ/kg)	λ_p

اعداد بدون بعد

عدد ارشميدس	Ar
عدد رينولدز	Re
عدد ناسلت	Nu
عدد اشميت	Sc
عدد شروود	Sh
عدد پرانتل	Pr

تاريخ دريافت: ۸۷/۴/۲۳ ؛ تاريخ پذيرش: ۸۷/۱۲/۱۹

مراجع

[1] Fasina, O. O., Tyler, R. T., Pickard, M. D., Modeling the Infrared Radiative Heating of Agriculture Crops, *Drying Technology-An International Journal*, **16** (9-10), p. 2065 (1998).

[2] Afzal, M. T., Abe, T. and Hilida, Y., Energy and Quality Aspect During Combined FIR-Convection Drying of Barely, *Journal of Food Engineering*, **42**, p. 177 (1999).

[3] Izadifar, M., Mowla, D., Simulation of a Cross-Flow Continuous Fluidized Bed Dryer for Paddy Rice, *Journal of Food Engineering*, **58**, p. 325 (2003).

[4] Hatamippour, 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).

[5] Sakai, N., Hazawa, T. Applications and Advances in Far-Infrared Heating in Japan, *Trends food, Sci Technol,* **5**, p. 357 (1994).

[6] Naret Meeso et al. Modeling of far-infrared irradiation in paddy drying process. *Journal of Food Engineering*, **78**(4), p. 1248 (2006).

[7] Ginzburg, A, S., "Application of Infrared Radiation in Food Processing" London; Leonard Hill Books (1969).

[8] Ranjan, R., Irudayaraj, J., and Jun, S., Simulation of Infrared Drying Process, *Drying Technology*, **20**(2), p. 363 (2002).

[9] Isengard, H. D. and Prager, H., Water Determination in Products with High Suger Content by Infrared Drying, *Food Chemistry,* **82**, p. 161 (2003).

[10] Togrul, H., Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot, *Journal of food engineering,* **77**, p. 610 (2006).

[11] Sharma, G. P., Verma, R. C., Pathare. P. B., Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Onion Slices, *Journal of food engineering*, **67**, p. 361 (2005a).

[12] Hebber, U. H., Vishwanathan, K. H. and Ramesh, M. N., Development of Combined Infrared and Hot Air Dryer for Vegetables, *Journal of Food Engineering*, **65**, p. 557 (2004).

[13] Sharma, G. P., Verma, R. C. and Pathare, P. B., Mathematical Modelling of Infrared Radiation Thin Layer Drying of Onion Slices, *Journal of food engineering,* **71**, p. 282 (2005b).

[14] Abbasi, B. and Mowla, D., Experimental and Theoretical Investigation of Drying Behaviour of Garlic in an Inert Medium Fluidized Bed Assisted by Microwave, *Journal of Food Engineering*, **88**, p. 438 (2008).

[15] Soojin Jun and Joseph Irudayaraj, Selective far Infrared Heating System-Design and Evaluation, *Drying Technology*, **21** (1), p. 51 (2003).

[16] Yang, H. W. and Gunasekaran, S., Comparison of Temperature Distribution in Model Food Cylinders Based on Maxwell's Equations and Lamberts Law During Pulsed Microwave Heating, *Journal of Food Engineering*, **64**, p. 445 (2004).

[17] Mult, A., Berna, A., Borras, M. and pinaga, F., Effect of Air Flow Rate on Drying of Carrots, *Drying Technology*,**5**(2), p. 245 (1987).

[18] Bak, Y. C., Son, J. E. and Kim, S. D., Heat Transfer Characteristics of a Vertical Tube in a Fludized Bed Combustor, *Int. chem.. Eng*., **29**(1), p. 166 (1989).

[19] Salagnac, P., Glouannec,P., and Lecharpentier, D., Numerical Modeling of Heat and Mass Transfer in Porous Medium During Combined Hot Air, Infrared and Microwave Heating, *International journal of heat and mass transfer*, **47**, p. 4479 (2004).

[20] ASHRAE Guide and Data Books, "American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering", New York (2005).

[21] Earle, R. L.,"Unit Operation in Food Processing", 2nd ed., Pergamon Press, Oxford. (1992).

[22] Keey, R. B., " Introduction to industrial drying operations", 1st, Pergamon, New York. (1978).