تعيين اثر تعداد سيني‌هاي توزيع كننده ماده خشک شونده بر ميزان بهينه‌سازي مصرف انرژي در خشک‌كن‌هاي بستر سيال

حسن پهلوانزاده+*

تهران، دانشگاه آزاد اسلامي، واحد تهران جنوب، دانشكده فني و مهندسي، گروه مهندسي شيمي

فرهاد قائم‌مقامي

تهران، دانشگاه تربيت مدرس، دانشكده فني و مهندسي، گروه مهندسي شيمي

چكيده: در اين پژوهش اثر وجود سه سيني در يک خشک‌كن بسترسيال كه موجب ايجاد سه جريان سيالي از ماده خشک‌شونده مي‌شود، براي نخستين بار مورد بررسي قرار گرفته‌است. براي انجام آزمايش‌ها يک خشک‌كن بسترسيال سيني‌دار آزمايشگاهي طراحي و ساخته‌شد و آزمايش‌هاي لازم به‌وسيله آن انجام گرفت. براي بررسي چگونگي تغييرهاي ضريب انتقال جرم روي سيني‌هاي متفاوت، نسبت كاهش ضريب انتقال‌جرم به‌صورت نسبت ضريب انتقال‌جرم روي سيني N ام به ضريب انتقال‌جرم روي سيني نخست، تعريف شده و مقدارآن به‌صورت تابعي از تعداد سيني‌ها ارايه شده‌است. هم‌چنين براي تعيين اثر تعداد سيني‌ها بر ميزان صرفه‌جويي در مصرف انرژي نسبت بازيافت انرژي به‌صورت نسبت انرژي منتقل‌شده به مواد در خشک‌كن با N سيني به انرژي منتقل شده به ذره‌ها در خشک‌كن با يک سيني تعريف و مقدار آن به‌صورت تابعي از تعداد سيني‌ها ارايه شده‌است. نتيجه‌ها نشان مي‌دهد كه نسبت بازيافت انرژي با توان ۰٫۸۲ تعداد سيني‌ها در يک خشک‌كن بسترسيال نسبت مستقيم دارد.

واژه‌هاي كليدي: خشک كردن، بسترسيال، عامل كاهش ضريب انتقال‌جرم، عامل بازيافت انرژي.

KEY WORDS: *Drying, Fluidized bed, Mass transfer coefficient attenuation factor, Energy recycling factor,*

مقدمه

در ميان انواع متفاوت خشك‌كن‌ها، خشك‌كن‌هاي بسترسيال از اهميت و جايگاه ويژه‌اي برخوردار هستند. از مزاياي اصلي اين نوع خشك‌كن‌ها مي‌توان به شرايط بسيار خوب انتقال‌جرم به‌دليل تماس خوب بين ذره‌ها و گاز خشك‌كننده، اختلاط خوب با يكنواختي مواد در محفظه خشك‌كن، توزيع دما و رطوبت يكنواخت درون بستر و ظرفيت بالاي خشك‌كردن، اشاره كرد [۱]. در مرحله خشک‌شدن با شدت تبخير ثابت، ميزان انتقال جرم به طور اساسي به مكانيسم انتقال در لايه مرزي بستگي دارد، ولي در مرحله خشک شدن با شدت تبخير نزولي، عامل كنترل‌كننده فرايند خشک كردن، مقاومت انتقال در داخل ماده است. بررسي آزمايشگاهي و نظري جهت تعيين مكانيسم‌هاي انتقال‌جرم در طول فرايند خشک‌كردن در خشک‌كن‌هاي بسترسيال، توسط *آبيد* و *همكارانش* انجام شده است [۲].

يكي از روش‌هاي تعيين ضريب انتقال‌جرم استفاده از نظريه

*عهده دار مكاتبات

+E-mail: pahlavzh@modares.ac.ir

تشابه مي‌باشد [۱]. انتقال جرم بين مواد تر و عامل خشك‌كننده به پارامترهاي خارجي بسياري بستگي دارد، اثر اين پارامترها به‌طور معمول به صورت اعداد بدون بعد بيان مي‌شوند. اين معادله‌ها براساس نوع انتقال‌جرم، ويژگي‌هاي فيزيكي سامانه و هيدروديناميك و هندسه سامانه، بسيار متنوع هستند و از ترتيب دادن آزمايش‌هاي متعدد به‌دست مي‌آيند [۳].

بر اين اساس براي فرايند خشك‌شدن مواد در خشك‌كن‌هاي بسترسيال، *توزر* و *همكارانش* [٤] معادله‌ها را بر حسب عددهاي بدون بعد j_D و j_H ارايه كرده‌اند. *آرنالدوس* و *همكارانش* [۵] آزمايش‌هايي را با استفاده از يک خشك‌كن بسترسيال و با مواد متفاوت انجام داده و مشاهده كردند كه كاهش فشار عملياتي، بر روي نرخ خشك‌شدن ذره‌ها متخلخل اثر بيشتري دارد. آزمايش‌هايي نيز توسط *كوزانگولا* و *همكارانش* [۶] براي تعيين ضريب انتقال‌جرم در خشك‌كن‌هاي بسترسيال تحت خلا انجام شده است و با توجه به نتايج نشان داده شده‌است كه ضريب انتقال‌جرم در فشارهاي پايين تابعي از عدد بدون بعد نودسن است.

پهلوانزاده و *قائم‌مقامي* نيز در يک پژوهش در خصوص خشك‌كن‌هاي بادي، معادله‌هايي را براي تعيين رابطه بين ضريب‌هاي انتقال‌جرم و حرارت در مرحله خشك‌شدن با نرخ تبخير ثابت و خشك‌شدن با نرخ تبخير نزولي ارايه كرده‌اند [۷].

از آنجاكه فرايند خشك‌كردن بسيار انرژي‌بر است، يافتن روش‌هايي كه بتوان در مصرف انرژي صرفه‌جويي كرد از اهميت بسيار زيادي برخوردار است.

يكي از اين روش‌ها استفاده از سيني‌هاي متفاوت در اين نوع خشك‌كن‌ها است. استفاده از سيني‌هاي مختلف در خشك‌كن سبب جلوگيري از هدر رفتن انرژي هواي خروجي از آن مي‌شود؛ زيرا هواي ورودي به هر سيني، هواي خروجي از سيني پيش خواهد بود. در اين حالت از پتانسيل هواي خروجي از يک سيني براي خشك‌كردن ماده در سيني بعدي استفاده مي‌شود.

هم‌چنين در اين‌حالت توزيع رطوبت در سيني‌هاي متفاوت، متفاوت خواهد بود. البته بايد توجه داشت كه رطوبت در هر سيني به‌صورت يكنواخت توزيع خواهد شد.

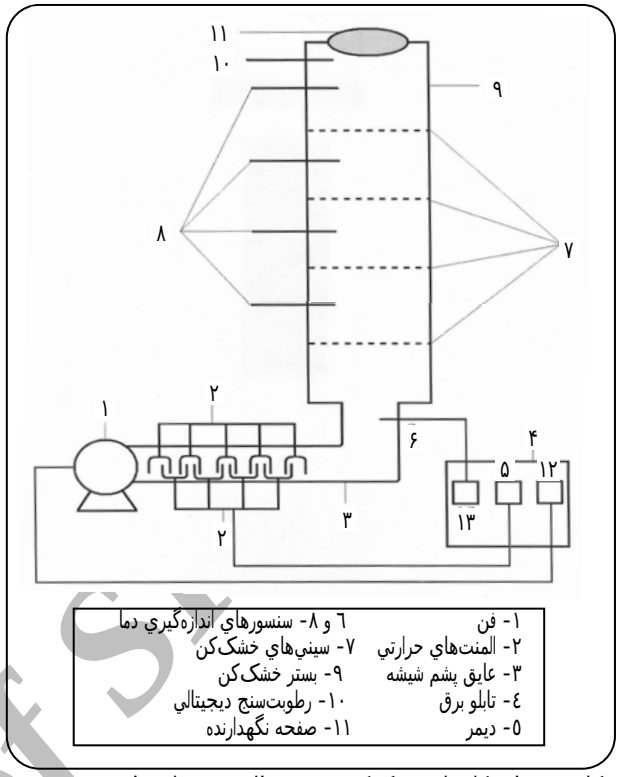
در اين پژوهش براي نخستين بار تاثير وجود چند جريان سيال ماده در يک خشك‌كن مورد تجربه قرار گرفته و دستگاه آزمايشگاهي خشك‌كن بسترسيال با وجود سه سيني مشبک براي ايجاد سه جريان سيال ماده در دانشگاه آزاد اسلامي واحد تهران‌جنوب ساخته شد. با به‌دست آوردن نتيجه‌هاي تجربي ضريب انتقال جرم و هم‌چنين ميزان مصرف انرژي در سيني‌هاي متفاوت، اثر تعداد سيني‌ها بر ميزان بازيافت انرژي مورد بررسي قرار گرفته‌است.

بخش تجربي

دستگاه آزمايشگاهي

به‌دليل پيچيدگي‌هاي زياد در سامانه‌ي خشك‌كن‌ها، طراحي خشك‌كن‌هاي صنعتي هنوز هم بيشتر مبتني بر دانش تجربي است [۸]. در اين پژوهش با استفاده از تجارب ساير پژوهشگران، ابتدا يك خشك‌كن بسترسيال سيني‌دار آزمايشگاهي طراحي و ساخته‌شد. شكل ۱ نماي كلي از خشك‌كن بسترسيال ساخته شده را نشان مي‌دهد.

در خشك‌كن ارايه شده در شكل ۱ از هوا به عنوان عامل خشك‌كننده استفاده شده‌است. هوا به‌وسيله‌ي يک فن سانتريفيوژ با توان W ۵۵۰ تأمين مي‌شود. اين نوع فن توانايي ايجاد سرعت‌هاي بالا را دارد و سرعت آن تا ۲۸۰۰ دور در دقيقه قابل تغيير است. براي تنظيم سرعت هوا نيز از يک اينورتر استفاده شده‌است كه با كم و زياد كردن فركانس آن، بدون تغيير در قدرت موتور، سرعت هوا را تنظيم مي‌كند. براي گرم كردن هوا از ده المنت الكتريكي U شكل كه توان هر كدام از آن‌ها W ۵۰۰ است، استفاده شده‌است. المنت‌هاي الكتريكي U شكل مقاومت حرارتي بالايي (نسبت به المنت‌هاي ديگر مانند المنت‌هاي فنري) دارند. ضمن اينكه پره‌دار بودن آنها سبب انتقال بهتر گرما به هوا مي‌شود. هم‌چنين براي جلوگيري از اتلاف انرژي در خشك‌كن، گرمكن هوا به‌وسيله‌ي پشم شيشه عايق شده‌است. دماي هواي گرم‌كن نيز به‌وسيله‌ي يک ديمر صنعتي و به‌صورت دستي كنترل مي‌شود. بستر خشك‌كن از جنس استيل انتخاب شده‌است. براي ممانعت از هدر رفتن انرژي ورودي به خشك‌كن و هم‌چنين امكان مشاهده داخل خشك‌كن درب خشك‌كن از جنس شيشه نشكن انتخاب شده‌است. سطح مقطع خشك‌كن مربعي به مساحت ۵۲۹ سانتيمتر مربع و ارتفاع آن نيز ۱٤۰ سانتيمتر است. هم‌چنين خشك‌كن از سه سيني مشبک از جنس آهن گالوانيزه كه به فاصله ۲۰ سانتيمتر از يكديگر قرار دارند تشكيل شده‌است كه اين فاصله‌ها قابل تغيير است. براي جلوگيري از خروج مواد به‌همراه هوا از يک صفحه نگهدارنده مشبک در انتهاي خشك‌كن استفاده شده‌است. دما و رطوبت نسبي هواي خروجي از سيني‌هاي متفاوت نيز به‌وسيله‌ي يک دستگاه رطوبت سنج Testo اندازه‌گيري مي‌شوند.



شكل ۱ـ نماي كلي از خشك‌كن بسترسيال سينی‌دار ساخته‌شده.

روش انجام آزمايش‌ها

براي انجـام آزمـايش‌هـا از ذرت بـا قطـر متوسـط ۳ ميليمتـر استفاده شد. در هر آزمايش مقدار ۱۰۰ گرم ذرت با رطوبـت اوليـه (kg H_2O/kg dry solid) ۰/۷۱ براي هر سينی انتخاب شد.

آزمايش‌ها به روش فاكتوريل كامل در سه سطح براي دما و سرعت هواي ورودي طراحي شدند. سرعت‌ها و دماها به‌ترتيب عبارت بودند از ۹ m/s، ۱۱ m/s و ۱۳ m/s و ۴۰ °C، ۴۵ °C، ۵۰ °C. دماي مواد ورودي به خشك‌كن و رطوبت مطلق هواي ورودي به خشك‌كن نيز در همه آزمايش‌ها به ترتيب برابر با ۱۸ °C و (kg H_2O/kg dry air) ۰/۰۰۶ بود. براي هر آزمايش وزن ماده خشك‌شونده روي هر سينی و دما و رطوبت نسبي هواي خروجي از هر سينی بر حسب زمان اندازه‌گيري و ثبت شدند.

داده هاي تجربي

تعداد ۹ آزمايش در شرايط عملياتي متفاوت انجام شد. به عنوان نمونه داده‌هاي به‌دست آمده براي آزمايش نخست كه دماي هواي خروجي از هر سينی و جرم ماده روي هر سينی را در زمان‌هاي متفاوت نشان مي‌دهد، در جدول ۲ ارايه شده است.

سينتيك خشك شدن مواد

براي تعيين سينتيک خشک‌شدن مواد، معادله‌هاي متفاوتي ارايه شده است از مهم‌ترين اين معادله‌ها مي‌توان به معادله‌هايي كه توسط *كوئيروز* و *همكارانش* پيشنهاد شده و همچنين به‌معادله‌ي ارايه شده توسط *جانت* و *همكارانش* اشاره‌كرد [۹ و ۱۰]. در اين پژوهش با استفاده از تغييرهاي جرم ماده بر حسب زمان و به‌كارگيري معادله‌ي (۱) تغييرهاي سينتيک خشک‌شدن ماده در هر سينی در مرحله خشک‌شدن با نرخ تبخير ثابت براي آزمايش‌هاي متفاوت محاسبه و در شكل ۲ به‌صورت تابعي از شماره سينی‌ها ارايه شده‌اند.

$$W_D = -\frac{W_S}{A}\frac{dX}{dt} \qquad (۱)$$

شكل ۲ نشان مي‌دهد كه نرخ خشک‌شدن ماده روي سينی‌هاي بالاتر كمتر است. علت اين مساله آن است كه پتانسيل هواي خشک‌كننده با عبور از روي سينی‌ها كاهش مي‌يابد و موجب كاهش نرخ خشک‌شدن ماده مي‌شود. همچنين شكل ۲ نشان مي‌دهد كه ميزان كاهش نرخ خشک‌شدن ماده بر حسب شماره سينی با افزايش دما و سرعت هواي ورودي افزايش مي‌يابد.

همچنين تغييرهاي دماي هواي خروجي از هر سينی براي آزمايش‌هاي متفاوت در شكل ۳ به‌صورت تابعي از شماره سينی‌ها (براي آزمايش‌هاي متفاوت) ارايه شده‌اند. شكل ۳ نشان مي‌دهد كه با افزايش تعداد سينی‌ها در يک خشک‌كن بستر سيال دماي هواي خروجي از خشک‌كن كاهش مي‌يابد. بنابراين، از پتانسيل هواي ورودي به ميزان بيشتري استفاده شده‌است.

رطوبت مطلق هواي خروجي نيز با استفاده از نتيجه‌هاي تجربي به‌دست آمده و معادله‌ي (۲) محاسبه مي‌شود.

$$y_{g,out} = \left(\frac{M_A}{M_B}\right)\frac{P_{A,out}}{P_t - P_{A,out}} \qquad (۲)$$

كه در آن، P_A فشار جزئي بخار آب در هوا مي‌باشد و با استفاده از معادله‌ي (۳) به‌دست مي‌آيد.

$$P_A = \varphi.P_A^S \qquad (۳)$$

كه در آن، P_A^S فشار بخار آب در دماي هر سينی است.

شكل ۴ تغييرات رطوبت مطلق هواي خروجي از خشک‌كن را به‌صـورت تابعـي از شمـاره سينی‌هـا بـراي آزمايش‌هـاي مختلف نشان مي‌دهد. شكل ۴ نشان مي‌دهد كه با افزايش تعداد سينی‌ها در خشک‌كن‌هاي بسترسيال رطوبت مطلق هواي خروجي از خشک‌كن افزايش مي‌يابد؛ بنابرايـن، استفاده از سينی‌هاي متعدد در اين نـوع

جدول ۲ـ داده‌هاي آزمايشگاهي براي آزمايش نخست.

t (s)	شماره سيني					
	۱		۲		۳	
	$T_{g,out}$(°C)	W(g)	$T_{g,out}$(°C)	W(g)	$T_{g,out}$(°C)	W(g)
۶۰	۳۷/۹	۹۸/۱	۳۶/۳	۹۸/۵	۳۴/۹	۹۸/۸
۱۲۰	۳۷/۹	۹۶/۲	۳۶/۳	۹۷	۳۴/۹	۹۷/۶
۲۴۰	۳۸	۹۲/۹	۳۶/۶	۹۴/۲	۳۵/۵	۹۵/۳
۲۴۰	۳۸/۳	۸۸/۹	۳۷/۴	۹۰/۷	۳۶/۷	۹۲/۲
۶۰۰	۳۸/۶	۸۵/۸	۳۸	۸۷/۶	۳۷/۶	۸۹/۱
۹۰۰	۳۸/۸	۸۱/۶	۳۸/۵	۸۳/۶	۳۸/۲	۸۵/۵

خشک‌کن‌ها سبب انتقال بيشتر رطوبت به هواي خشک‌کننده و در نتيجه استفاده بهينه از انرژي هواي ورودي مي‌شود.

نسبت کاهش ضريب انتقال جرم

براي تعيين ضريب انتقال جرم بين ماده و هوا، از موازنه سينتيکي جرم (رطوبت) در فاز گاز به‌صورت معادله‌ي (۴) استفاده شده‌است.

$$k_g A\left(y_s - y_g\right) = W_B\left(y_{g,out} - y_{g,in}\right) \qquad (۴)$$

که در آن، W_B دبي هواي خشک ورودي به خشک‌کن، y_g رطوبت مطلق هوا و y_s رطوبت مطلق هوا در حالت اشباع هستند.

در مرحله خشک‌شدن با نرخ تبخير ثابت رطوبت هوا در سطح ماده برابر با رطوبت اشباع هواست. مقدار نيروي محرکه انتقال جرم نيز برابر با متوسط لگاريتمي نيروي محرکه در ابتدا و انتهاي خشک‌کن در نظر گرفته شده‌است. سطح انتقال جرم بين هوا و ماده هم برابر با سطح دانه‌هاي خشک‌شونده است. بنابراين، با توجه به اينکه همه مقدارها در معادله‌ي ۴ معلوم هستند، ضريب انتقال‌جرم بر روي سيني‌هاي متفاوت (براي آزمايش‌هاي متفاوت) محاسبه شده‌است. شکل ۵ مقدارهاي ضريب انتقال‌جرم بر روي سيني‌هاي متفاوت را براي آزمايش‌هاي متفاوت نشان مي‌دهد.

شکل ۵ نشان مي‌دهد که در مرحله خشک‌شدن با نرخ تبخير ثابت با افزايش شماره سيني، ضريب انتقال‌جرم کاهش مي‌يابد. بنابراين، در اين‌حالت مي‌توان عاملي با عنوان نسبت کاهش ضريب انتقال‌جرم را به‌صورت نسبت ضريب انتقال جرم روي سيني N ام (k_N) به ضريب انتقال جرم روي سيني نخست (k_1) تعريف کرد.

$$d_k = \frac{k_N}{k_1} \qquad (۵)$$

با داشتن مقدارهاي ضريب انتقال‌جرم روي سيني‌هاي متفاوت، مي‌توان نسبت کاهش ضريب انتقال‌جرم را با استفاده از معادله‌ي (۵) محاسبه و سپس آن‌را مطابق معادله‌ي (۶) به‌صورت تابعي از شماره سيني، ارايه کرد. مقدارهاي نسبت کاهش ضريب انتقال‌جرم بر حسب شماره سيني در شکل ۶ ترسيم شده‌است و نشان مي‌دهد مقدار اين عامل با افزايش تعداد سيني در خشک کن، کاهش مي‌يابد.

$$d_k = \frac{k_N}{k_1} = N^{-0.28} \qquad (۶)$$

بنابراين:

$$\frac{k_N}{k_M} = \left(\frac{N}{M}\right)^{-0.28} \qquad (۷)$$

با استفاده از معادله‌هاي (۷) و (۸) در مرحله خشک‌شدن با نرخ تبخير ثابت، مي‌توان با داشتن ضريب انتقال‌جرم روي يک سيني ضريب انتقال‌جرم روي هر کدام از سيني‌ها را محاسبه کرد.

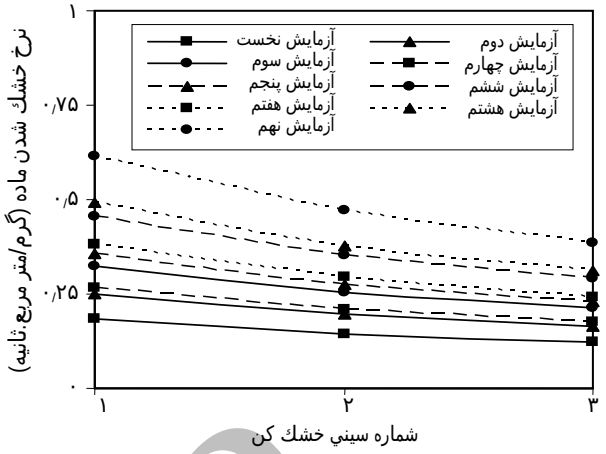
نسبت بازيافت انرژي

ميزان انرژي منتقل شده به مواد خشک‌شونده در مرحله خشک‌شدن با نرخ تبخير ثابت را مي‌توان با استفاده از معادله‌ي (۸) محاسبه کرد.

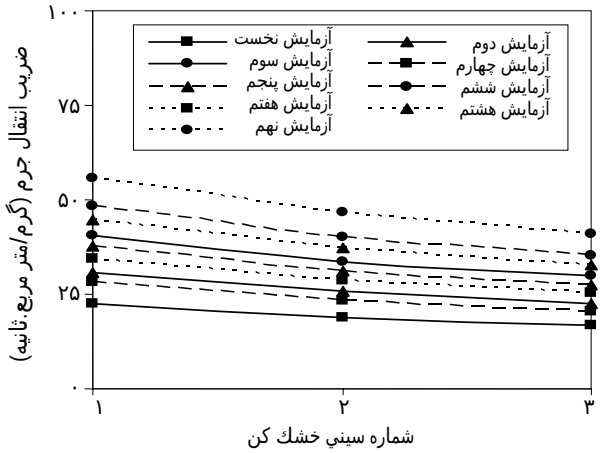
$$q = W_D.A.\Delta H_\upsilon \qquad (۸)$$

با استفاده از معادله‌ي (۸) و نتايج شکل ۲ مقدار انرژي منتقل شده به مواد خشک‌شونده برحسب تعداد سيني‌هاي خشک‌کن (براي آزمايش‌هاي متفاوت) محاسبه و نتيجه‌هاي آن در شکل ۷ ارايه شده است.

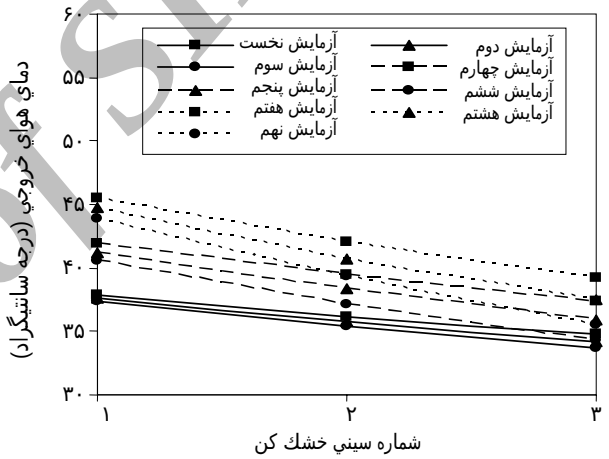
شکل ۷ نشان مي‌دهد که ميزان انرژي منتقل شده به مواد با افزايش تعداد سيني‌هاي خشک‌کن افزايش مي‌يابد. بنابراين، از پتانسيل



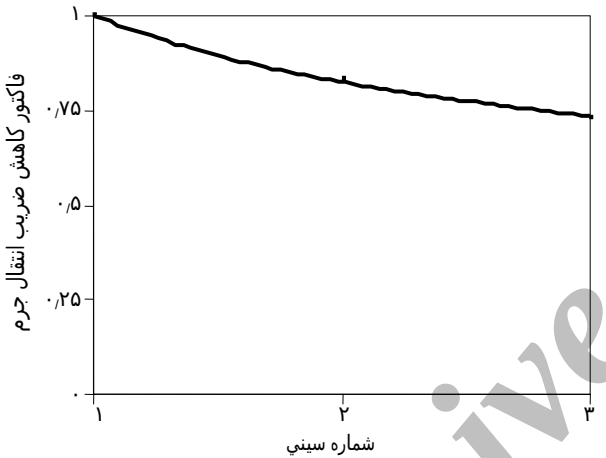
شكل ۲ـ تغييرهاي نرخ خشك‌شدن مـاده روي سـيني‌هـاي متفـاوت در مرحله خشك‌شدن با نرخ تبخير ثابت براي آزمايش‌هاي متفاوت.



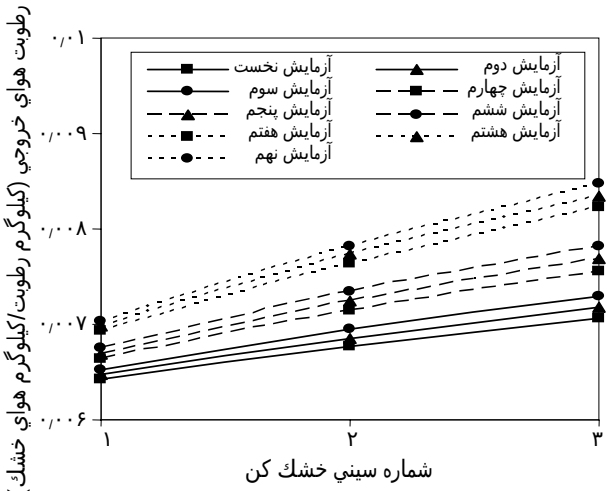
شكل ۵ ـ ضريب انتقـال جـرم روي سـيني‌هـاي متفـاوت در مرحلـه خشك‌شدن با نرخ تبخير ثابت براي آزمايش‌هاي متفاوت.



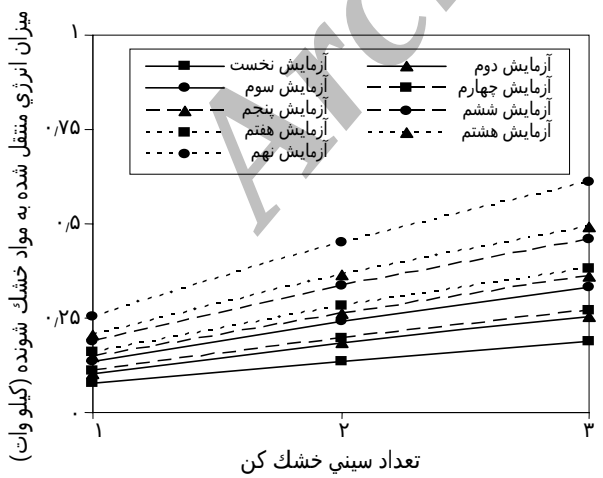
شكل ۳ـ تغييرهاي دماي هواي خروجي از سيني‌هاي متفاوت در مرحله خشك‌شدن با نرخ تبخير ثابت براي آزمايش‌هاي متفاوت.



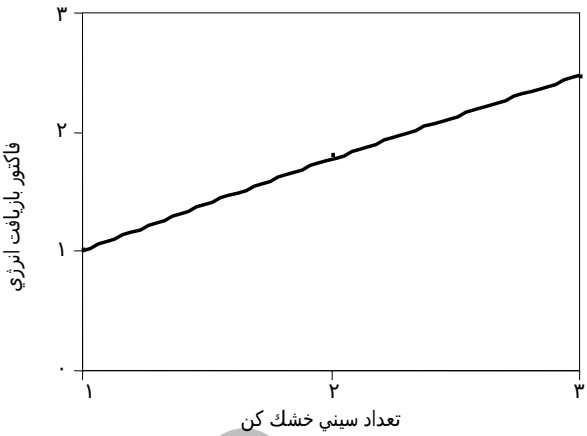
شكل ۶ـ تغييرهاي فاكتور كاهش ضريب انتقال‌جرم بر حسب شـماره سيني خشك‌كن.



شكل ۴ـ تغييرهاي رطوبـت هـواي خروجـي از سـيني‌هـاي متفـاوت در مرحله خشك‌شدن با نرخ تبخير ثابت براي آزمايش‌هاي متفاوت.



شكل ۷ـ تغييرهاي ميزان انرژي منتقل شده بـه مـواد خـشك‌شـونده بر حسب تعداد سيني‌هاي خشك‌كن براي آزمايش‌هاي متفاوت.



شكل ۸ ـ تغييرهاي فاكتور بازيافت انرژي بر حسب تعداد سينيهاي خشككن.

هواي ورودي به خشككن به ميزان بيشتري استفاده ميشود؛ كه اين امر سبب استفاده بهينه از انرژي ميشود. در اينحالت نيز ميتوان عاملي با عنوان نسبت بازيافت انرژي را بهصورت نسبت انرژي منتقل شده به مواد خشكشونده در خشككن با N سيني به انرژي منتقل شده به مواد خشكشونده در خشككن با يک سيني تعريف كرد.

$$i_q = \frac{q_N}{q_1} \qquad (۹)$$

با داشتن مقدارهاي انرژي منتقل شده به مواد خشكشونده، ميتوان مطابق شكل ۸ معادلهي (۱۰) را براي نسبت بازيافت انرژي، بهصورت تابعي از تعداد سينيهاي خشک كن، ارايه كرد.

$$i_q = \frac{q_N}{q_1} = N^{0.82} \qquad (۱۰)$$

بنابراين:

$$\frac{q_N}{q_M} = \left(\frac{N}{M}\right)^{0.82} \qquad (۱۱)$$

بنابراين، در مرحله خشكشدن با نرخ تبخير ثابت، با داشتن ميزان انرژي منتقل شده به مواد در خشككن با يک سيني ميتوان ميزان افزايش انرژي منتقل شده به مواد در اثر افزايش تعداد سينيها براي خشككن با تعداد سينيهاي بيشتر را محاسبه كرد. البته معادلهي (۱۰) نشان ميدهد كه ميزان انرژي منتقل شده به مواد در يک خشككن با N سيني همواره كمتر از انرژي منتقل شده به مواد در N خشككن با يک سيني است.

نتيجه گيري

يک خشككن بستر سيالِ سينيدار آزمايشگاهي كه در آن سه جريان بسترسيالي از ماده خشكشونده ايجاد ميشود، طراحي و ساخته شد و آزمايشهاي لازم براي بهدست آوردن ضريب انتقالجرم روي سينيهاي متفاوت و ميزان انرژي منتقل شده به مواد خشكشونده، انجام گرفت. براي انجام آزمايشها از ذرت بهعنوان ماده خشكشونده استفاده شد. آزمايشها در سه دماي هواي ورودي ۴۰°C و ۴۵°C و ۵۰°C و در سه سرعت هواي ورودي ۹ m/s و ۱۱ m/s و ۱۳ m/s صورت گرفت. براي بررسي چگونگي تغييرهاي ضريب انتقالجرم روي سينيهاي متفاوت نسبت كاهش ضريب انتقالجرم بهصورت نسبت ضريب انتقالجرم روي سيني N ام به ضريب انتقالجرم روي سيني نخست تعريف شد. نتيجهها نشان ميدهد كه مقدار ضريب انتقال جرم در سينيهاي بالاتر كمتر از ضريب انتقالجرم در سينيهاي پايينتر است و با توان ۰٫۲۸ شماره سيني ها نسبت معكوس دارد. همچنين براي تعيين اثر تعداد سينيهاي خشككن بر ميزان انرژي منتقل شده به مواد نسبت بازيافت انرژي بهصورت نسبت ميزان انرژي منتقل شده به مواد در خشككن با N سيني به ميزان انرژي منتقل شده به مواد در خشككن با يک سيني تعريف و مقدار آن بر حسب تابعي از تعداد سينيها تعيين شد. نتيجههاي بهدستآمده نشان ميدهد كه نسبت بازيافت انرژي با توان ۰٫۸۲ تعداد سينيها نسبت مستقيم دارد. با توجه به به اين نسبت، افزايش تعداد سينيها در يک خشككن بسترسيال در استفاده بهينه از پتانسيل هواي ورودي به خشككن نقش بسيار زيادي دارد.

فهرست علايم

سطح انتقال جرم	$A\left[m^2\right]$
رطوبت ماده	$X\left[\frac{kg\ H_2O}{Kg\ dry\ solid}\right]$
سرعت	$U\left[\frac{m}{s}\right]$
دما	$T[°C]$
ضريب انتقال جرم	$k\left[\frac{g}{m^2.s}\right]$
وزن	$W[g]$
عامل كاهش	d
رطوبت مطلق گاز	$y\left[\frac{kg\ H_2O}{kg\ dry\ air}\right]$
رطوبت نسبي	φ
زمان	$t[s]$
شماره سيني	N

دما	T[°C]	گاز خروجي	g,out
فشار	P[mmHg]	اشباع	s
انرژي	q[kW]	هواي خشک	B
فاكتور بازيافت	i	ماده خشک	S
گرماي نهان تبخير	$\Delta H\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	بخار	υ
		آب	A
		كل	t
اندیس‌ها		جرم مولكولي	M
گاز	g		
گاز ورودي	g,in		

تاريخ دريافت: ۸۶/۱۲/۱۳ ؛ تاريخ پذيرش: ۸۸/۳/۱۸

مراجع

[۱] استرامیلو، سزلا؛ تادیوز کودرا؛ مترجم: پهلوانزاده، حسن؛ خشك كردن، اصول، كاربرد و طراحي، دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمي، (۱۳۷۷).

[2] Abid, M., Gibert, R., Laguerie, C., An Experimental and Theoretical Analysis of the Mechanisms of Heat and Mass Transfer During the Drying of Corn Grains in a Fluidized Bed, *International Chemical Engineering* **30** (4), p. 632 (1990).

[3] Bennett, C.O., Myres. J.E., "Momentum, Heat and mass transfer", McGraw Hill, London. (1962).

[4] Torrez, N., Gustafsson, M., Schreil, A., Martinez, J., Modelling and Simulation of Cross Flow Moving Bed Dryers, *Drying Technology*, **(9&10)**, p. 1999 (1998).

[5] Arnaldos, J., Kozangola, B., and Casel, J., Vacuum Fluidization: Application to Drying, *Proccedings of the ninth International fluidization conference*, (p.709), New York, Engineering Foundation, (1998).

[6] Kozangola, B. U., Vilchez, J. A. and Arnaldos, J., Mass Transfer Coefficient in Vacuum Fluidized Bed Drying, *Chem. Eng. Sc.*, **56**, p. 3899 (2001).

[۷] پهلوانزاده، حسن؛ قائم‌مقامي، فرهاد؛ تعيين ضريب هاي انتقال جرم و حرارت درخشک‌كن هاي بستر سيال به صورت تابعي از رطوبت ماده، *نشريه شيمي و مهندسي شيمي ايران*، ۲۷ (٤)، (۱۳۸۷) .

[8] Hovmand, S., Fluidized-Bed Drying. In A. S. Mujumdar, Hand Book of Industrial Drying 2nd Edition, p. 165 (1987).

[9] Queiroz, R., Gabas, A.L., Telis, V. R. N., Drying Kinetics of Tomato Using Electric Resistance and Heat Pump Dryers, *Drying Technology*, **22**(7), p. 1603 (2004).

[10] Jannot, Y., Talla, A., Nganhou, J., Puiggali, J. R., Modelling of Banana Convective Drying by the Drying Characteristic Curve (DCC) Method, **22**(8), p. 1949 (2004).