

## بررسی آزمایشگاهی سینتیک خشک شدن دانه‌های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته جریان مخالف حاوی ذرات بی‌اثر

مهدی مرادی<sup>۱\*</sup>، علی زمردیان<sup>۲</sup>

۱- استادیار مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۲- استاد مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۵

پیام‌نگار: moradih@shirazu.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق سینتیک خشک شدن دانه‌های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته جریان مخالف، در حالت‌های متفاوت خشک شدن بررسی شد. به منظور ارزیابی فرایند خشک شدن، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی طی سه بار تکرار انجام گرفت. نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر متقابل دوگانه همه پارامترهای به کار رفته بر رطوبت نهایی محصول، معنی‌دار بوده و سایر اثرهای متقابل فاقد معنی بودند. بر این اساس، نتیجه گرفته شد که افزایش دما و سرعت هوای خشک کننده، افزایش نسبت جریان جرمی ذرات بی‌اثر به دانه‌های ذرت و کاهش سرعت حرکت دانه‌های درون مخزن، باعث تسریع در روند خشک شدن آنها می‌شود، به گونه‌ای که سریع‌ترین حالت خشک شدن حالتی است که دما و آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده، نسبت کاربرد ذرات بی‌اثر و آهنگ جریان جرمی دانه‌های خروجی از مخزن به ترتیب دارای مقادیر ۷۰ درجه سلسیوس، ۱/۵ کیلوگرم بر دقیقه، ۳ و ۰/۱۷ کیلوگرم بر دقیقه باشند.

کلیدواژه‌ها: ذرات بی‌اثر، ذرت، خشک‌کن جریان مخالف، سینتیک خشک شدن.

### ۱. مقدمه

خشک کردن یکی از مهمترین فرایندهایی است که پس از برداشت بر روی مواد غذایی انجام می‌گیرد [۱]. محصولات خشک شده جایگزین بسیار مناسبی برای محصولات تازه‌اند. روش‌های مختلفی برای خشک کردن انبوه محصولات کشاورزی در دسترس‌اند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. در سال‌های اخیر استفاده از روش بستر متحرک برای خشک شدن دانه‌ها با استقبال

پژوهشگران زیادی مواجه شده است [۷-۲].

استفاده از این روش برای خشک کردن محصولات، دارای مزایای زیادی از قبیل سرمایه اولیه، انرژی مصرفی و آسیبهای مکانیکی کمتر به دانه‌ها در مقایسه با سایر انواع روش‌های خشک کردن هستند [۳]. خشک‌کن‌های بستر متحرک به سه نوع جریان موافق، جریان مخالف و جریان عرضی تقسیم بندی می‌شوند [۸]. خشک کردن به روش موازی (جریان مخالف و جریان موافق) در مقایسه با خشک‌کن نوع جریان عرضی، به دلیل خشک شدن

\* شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، بخش مهندسی بیوسیستم

یکنواخت‌تر محصول و بهره‌برداری بهتر از انرژی، ارجحیت دارد [۹]. در خشک‌کن پیوسته نوع جریان موافق، چون هوای سرد مرطوب از میان دانه‌های خشک شده عبور می‌کند، به سختی می‌توان محصولی با رطوبت پایین دریافت کرد [۱۰]. در خشک‌کن پیوسته جریان مخالف، جهت جریان غلات و هوای گرم خشک‌کننده مخالف یکدیگرند، به همین دلیل هوای گرم با غله گرم برخورد می‌کند و افت دمای هوای خشک‌کننده در طول بستر کمتر خواهد بود [۱۱]. در اکثر روش‌های به کار رفته برای خشک‌کردن انبوه محصولات دانه‌ای مانند ذرت، مدت زمان زیادی صرف انجام فرایند می‌شود. بنابراین، امروزه پژوهشگران به دنبال تحقیق بر روی روش‌های ترکیبی خشک‌شدن‌اند که موجب خشک‌شدن سریع‌تر دانه‌ها شود. یکی از روش‌هایی که امروزه برای انجام بهتر فرایند انتقال گرما به داخل مواد خشک شونده، اختیار می‌شود، بهره‌گیری از ذرات حامل انرژی<sup>۱</sup> (بی‌اثر) است. در این روش، ذراتی با جنس غیر از جنس مواد خشک شونده که دارای ظرفیت گرمایی پایین و رسانایی بالاینند، در داخل محفظه خشک‌کن قرار داده می‌شوند. انتقال گرما از هوای خشک‌کننده به ذرات بی‌اثر خیلی سریع انجام می‌شود و آنها نیز گرما را به دلیل برخورداری از ضریب رسانایی بالا و ظرفیت حرارتی پایین، به مواد خشک شونده منتقل می‌کنند. بنابراین، مواد خشک‌شونده خیلی سریع گرم می‌شود و انتقال رطوبت از دانه‌ها به هوای خشک شونده سریع‌تر از حالت معمولی صورت می‌پذیرد و جسم با سرعت بیشتری خشک خواهد شد [۱۶-۱۲]. به بیان دیگر، با کمک ذرات بی‌اثر می‌توان دانه‌ها را علاوه بر روش همرفتی با روش رسانش نیز گرم کرد تا سریع‌تر به دمای نهایی‌شان برسند [۱۷]. البته تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است که در ادامه به بعضی از آنها اشاره می‌شود. فرایند خشک‌شدن الیاف خرد شده ساقه نخل<sup>۲</sup> در یک خشک‌کن بستر سیال همراه با ذرات بی‌اثر بررسی شد. در تحقیق یادشده از شن ریزه به عنوان ذرات بی‌اثر استفاده شد. نتایج نشان داد که بالاترین آهنگ خشک‌شدن در حداکثر دما و سرعت هوای ورودی و بیشترین مقدار ذرات بی‌اثر اتفاق می‌افتد [۱۸].

حاتمی‌پور و مولا [۱۹] از خشک‌کن بستر سیالی در ابعاد آزمایشگاهی، همراه با حامل‌های انرژی (فولاد و شیشه دارای

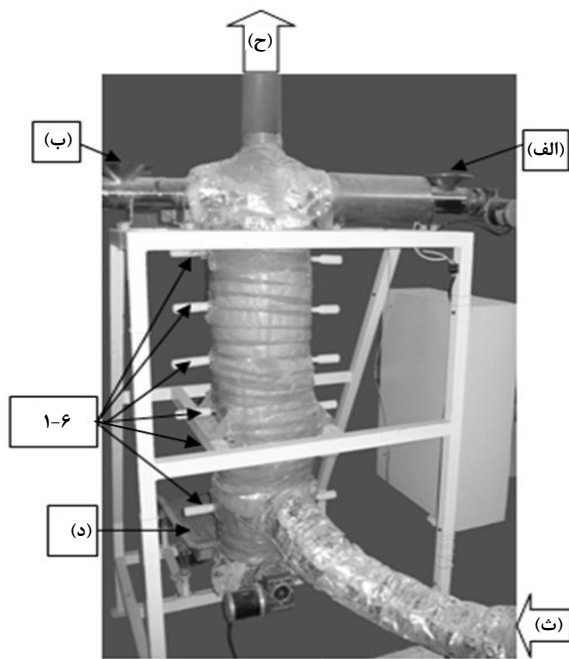
قطرهای ۲/۷ تا ۶ میلی‌متر) به منظور بررسی خشک‌شدن تکه‌های هویج بهره گرفتند. نتیجه از این قرار بود که وجود ذرات بی‌اثر (مستقل از قطرشان)، آهنگ خشک‌شدن را بالا می‌برد. لی و کیم [۲۰] اثر سرعت و دمای هوای ورودی و نسبت جرمی ذرات بی‌اثر به نشاسته مرطوب را بر آهنگ خشک‌شدن نشاسته در یک خشک‌کن بستر سیال بررسی کردند. بنابر نتیجه‌ای که گرفتند، آهنگ خشک‌شدن با افزایش سرعت و دمای هوا در این خشک‌کن بالا می‌رود. همچنین، آهنگ خشک‌شدن، با افزایش نسبت جرمی ذرات بی‌اثر به نشاسته مرطوب به آهستگی افزایش می‌یابد.

در پژوهش حاضر، سینتیک خشک‌شدن دانه‌های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته جریان مخالف مجهز به ذرات بی‌اثر فولادی بررسی شد. به این منظور، اثر پارامترهای مختلف خشک‌کردن در یک خشک‌کن نیمه صنعتی ساخته شده به صورت آزمایشگاهی بررسی شد تا مناسب‌ترین حالت برای خشک‌شدن دانه‌های ذرت در خشک‌کن پیوسته جریان مخالف معرفی شود.

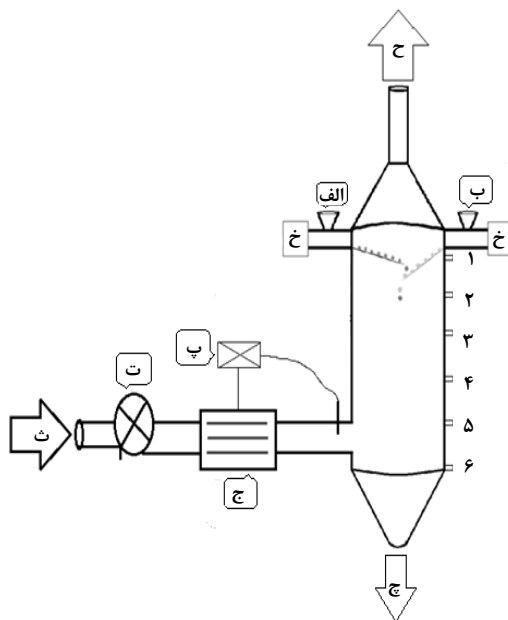
## ۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق یک دستگاه خشک‌کن پیوسته جریان مخالف ساخته شد (شکل (۱))، که در آن جریان هوای خشک‌کننده به صورت جابجایی واداشته از یک دمنده مجهز به موتور الکتریکی سه فاز (D) برقرار می‌شد. خشک‌کن نیمه صنعتی آزمایشگاهی ساخته شده در این طرح دارای یک مخزن استوانه‌ای به ارتفاع یک متر و قطر داخلی ۲۵ سانتی‌متر و ظرفیت تقریبی ۳۰ کیلوگرم ذرت بوده که در قسمت بالا دو محل برای ورود دانه‌های ذرت و ساچمه‌ها تعبیه شد (A و B). در تحقیقی که مولا و حاتمی‌پور [۱۲] روی فرایند خشک‌شدن دانه ذرت در خشک‌کن بستر سیال انجام دادند، از دو جنس فولاد ضدزنگ و شیشه به عنوان ذرات بی‌اثر بهره گرفتند. آنان کره‌های فولادی را به عنوان مناسب‌ترین جنس برای خشک‌شدن دانه‌های ذرت معرفی کردند. از این رو در این تحقیق ذرات بی‌اثر از جنس فولاد ضد زنگ و با قطر ۴ میلی‌متر با آهنگ از پیش تعیین شده‌ای از قسمت ورودی مخصوص ذرات بی‌اثر به داخل مخزن تغذیه می‌شد. قسمت ورود هوای گرم خشک‌کننده (E) نیز در نیمه پایینی مخزن قرار داده شد. البته هوای محیط با عبور از یک گرم‌کن الکتریکی ۶ کیلو وات (F) توسط دمنده (D) به داخل

1. Inert Particles  
2. Oil Palm Frond Fibers



شکل ۱- (الف)



شکل ۱- (ب)

توضیح: (الف) محل ورود ذرات بی‌اثر؛ (ب) محل ورود دانه‌های ذرت؛ (پ) واحد کنترل‌کننده دما؛ (ت) دمنده؛ (ث) ورودی هوای خشک‌کننده؛ (ج) گرم‌کن هوا؛ (چ) خروجی مواد جامد؛ (ح) خروجی هوا؛ (خ) موتور و جعبه دنده محرک نقاله ورودی؛ (د) الک لرزاننده؛ ۱-۶: محل‌های نمونه‌برداری از دانه‌های ذرت.

شکل ۱. (الف) نمودار کلی خشک‌کن به‌کار رفته؛

(ب) شکل واقعی دستگاه خشک‌کن

مخزن دمیده می‌شد که در آن دانه‌های ذرت در جریان (به سمت پایین) بودند. از آنجا که در قسمت خروج مواد جامد (G) در پایین مخزن، از یک ماریچ نقاله با گام  $2/5$  سانتی‌متری بهره گرفته شده بود، مقدار بسیار کمی از هوای گرم از آنجا خارج می‌شد ( $0/1$  متربرثانیه) ولی بخش اعظم هوای خشک‌کننده از بالای مخزن (H) به بیرون جریان می‌یافت. مخلوط دانه و ذرات بی‌اثر بر روی الک لرزان (J)، که مجهز به لرزاننده الکتریکی بود، ریخته شده و از همدیگر جدا می‌شدند. باید گفت که در این تحقیق از ذرت رقم دندان اسبی<sup>۱</sup> استفاده شد. از آنجا که رطوبت اولیه دانه‌ها هنگام انتقال به آزمایشگاه نایک‌نواخت بود، با افزودن آب مقطر طی چندین مرحله، رطوبت آنها به مقدار میانگین  $30$  درصد بر مبنای تر رسانیده شد. بنابراین، دانه‌های ذرت برای خشک شدن در داخل دستگاه خشک‌کن پیوسته جریان مخالف ریخته می‌شدند. نحوه انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که ابتدا دانه‌های ذرت از محل ورودی با آهنگ مشخص تغذیه می‌شد (شکل ۱- الف و ب). پس از پر شدن مخزن، موتور محرک نقاله خروجی مواد جامد که در قسمت پایین دستگاه قرار داشت، روشن می‌شد. آهنگ جریان جرمی دانه‌های خروجی از مخزن را نقاله خروجی مواد کنترل می‌کرد. سرعت موتور جریان مستقیم<sup>۲</sup> برقرار شده برای خروج مواد توسط وارونگر نصب شده در داخل تابلو برق قابل کنترل بود. البته باید گفت که وارونگر قبل از استفاده با زمان‌گیر دستی مدرج شد. آزمایش‌ها در چهار سطح نسبت دبی جرمی ورودی ذرات بی‌اثر به دبی جرمی دانه‌های ورودی (صفر، ۱، ۲ و ۳)، سه سطح دمای هوای خشک‌کننده ( $50$ ،  $60$  و  $70$  درجه سلسیوس)، سه سطح آهنگ جریان جرمی دانه‌های خروجی از مخزن ( $0/17$ ،  $0/25$  و  $0/5$  کیلوگرم بر دقیقه)، سه سطح مختلف آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده ( $0/5$ ،  $1$  و  $1/5$  کیلوگرم بر دقیقه)، محل نمونه‌برداری (در ۶ نقطه با فواصل یکسان) و در سه بار تکرار انجام شد. در خلال آزمایش‌ها، نمونه‌گیری از دانه‌های داخل مخزن با فواصل زمانی مشخص انجام می‌شد، به گونه‌ای که در طول هر آزمایش، در ۵ مرحله زمانی نمونه‌برداری از قسمت‌های مختلف مخزن صورت گرفت.

1. Dent Corn  
2. Direct Current

نمونه‌های دانه ذرت از ۶ جای مختلف مخزن خشک‌کن (شکل (۱)) به دست آمده و پس از توزین با ترازوی دیجیتال A&D با دقت ۰/۰۰۱ گرم، نمونه‌ها به صورت جداگانه در داخل کوره الکتريکی (تحت دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس) قرار داده می‌شدند. بعد از سپری شدن ۱۶ ساعت، نمونه‌ها از داخل کوره بیرون آورده و با توزین ثانویه، درصد رطوبت آنها به دست آورده می‌شد. باید گفت که برای کنترل دمای هوای خشک‌کننده در قسمت ورودی، از یک ترموستات دیجیتال بهره گرفته می‌شد. در پژوهش حاضر، به منظور انجام تجزیه و تحلیل آماری از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد که این تحلیل توسط نرم‌افزار SPSS 16 انجام گرفت.

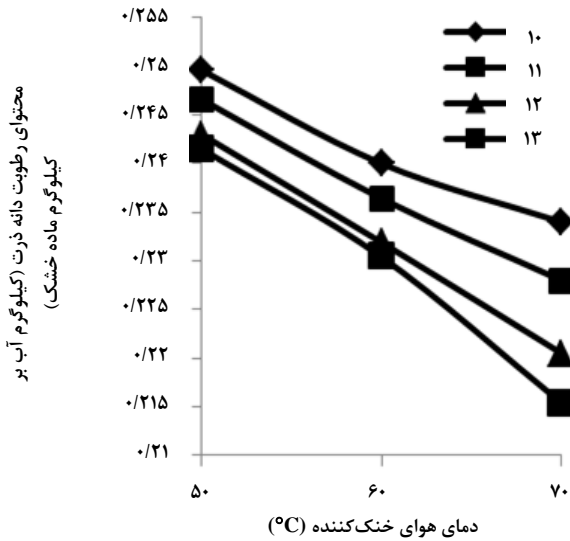
### ۳. نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مربوط به بررسی اثر پارامترهای مستقل بر محتوای رطوبت دانه‌های ذرت در جدول (۱) درج شده است. همان‌گونه که از این جدول استنباط می‌شود، همه پارامترهای اصلی و آثار متقابل دوگانه آنها اثر معنی داری بر محتوای رطوبت دانه‌های ذرت طی خشک‌شدن دارند. در بین آثار متقابل دوگانه، بیشترین تأثیر مربوط به اثر متقابل دو پارامتر آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده ( $\dot{m}_a$ ) و ارتفاع نمونه‌برداری (H) بوده است. در حالی که، کمترین تأثیر مربوط به اثر متقابل دو پارامتر دمای هوای خشک‌کننده (T) و نسبت جریان جرمی ذرات بی‌اثر به دانه‌ها (I) است. بالا بودن اثر متقابل آهنگ جریان جرمی هوا و ارتفاع نمونه‌برداری شاید به این دلیل باشد که پتانسیل رطوبت‌گیری هوای خشک‌کننده با افزایش آهنگ جریان جرمی آن به طور فزاینده‌ای بالا می‌رود، به گونه‌ای که حتی در سطوح بالاتر مخزن نیز آهنگ خشک‌شدن دانه‌ها را افزایش می‌دهد. کم بودن اثر متقابل دو پارامتر دمای هوای خشک‌کننده و اثر کاربرد ذرات بی‌اثر، شاید از این رو باشد که با افزایش دمای هوای خشک‌کننده تأثیر کاربرد ذرات بی‌اثر به مراتب کمتر از کاربرد سایر پارامترهای مورد بحث است. در ادامه، شکل‌های مربوط به بررسی آثار متقابل دوگانه پارامترها به همراه تفسیر آنها آورده شده است. اثر متقابل دمای هوای خشک‌کننده و آهنگ جریان جرمی دانه‌های خروجی از مخزن ( $\dot{m}_g$ ) نشان داد که شیب منحنی تغییرات رطوبت محصول نسبت به دمای

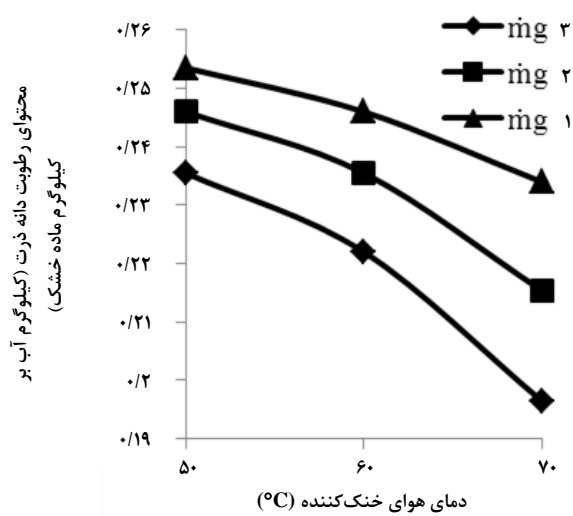
جدول ۱. تجزیه واریانس اثر پارامترهای اصلی و متقابل خشک شدن.

$F_s$	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
۳۱۸**	۰/۳۱۸	۰/۶۳۶	۲	T
۹۹۴**	۰/۹۹۴	۱/۹۸۸	۲	$\dot{m}_a$
۱۲۱**	۰/۱۲۱	۰/۳۶۲	۳	I
۸۵۷**	۰/۸۵۷	۱/۷۱۳	۲	$\dot{m}_g$
۴۲۰**	۴/۲۰	۲۱/۰۲۳	۵	H
-	۰/۰۰۱	۲/۰۸۴	۱۹۲۷	خطا
۱۸**	۰/۰۱۸	۰/۰۷۱	۴	$T*\dot{m}_a$
۳**	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳	۶	$T*I$
۸**	۰/۰۰۸	۰/۰۳۴	۴	$T*\dot{m}_g$
۲۷**	۰/۰۲۷	۰/۲۶۷	۱۰	$T*H$
۶۵**	۰/۰۶۵	۰/۶۵۴	۱۰	$\dot{m}_a*H$
۱۸**	۰/۰۱۸	۰/۲۷۵	۱۵	$I*H$
۵۳**	۰/۰۵۳	۰/۵۱۷	۱۰	$\dot{m}_g*H$
۳**	۰/۰۰۳۱	۰/۰۱۹	۶	$I*\dot{m}_g$
۱۲**	۰/۰۱۲	۰/۰۴۸	۴	$\dot{m}_a*\dot{m}_g$
۲/۹**	۰/۰۰۳	۰/۰۱۸	۶	$\dot{m}_a*I$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	۱۲	$T*\dot{m}_a*I$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۲	۸	$T*\dot{m}_a*\dot{m}_g$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۶	۲۰	$T*\dot{m}_a*H$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۹	۳۰	$T*I*H$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱۲	۲۰	$T*\dot{m}_g*H$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱۱	۳۰	$I*\dot{m}_g*H$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۲۵	۲۰	$\dot{m}_g*\dot{m}_a*H$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۱۲	$\dot{m}_a*\dot{m}_g*I$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱۳	۳۰	$\dot{m}_a*I*H$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۱۲	$T*I*\dot{m}_g$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۲۴	$T*I*\dot{m}_a*\dot{m}_g$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱۱	۶۰	$T*\dot{m}_a*I*H$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۴۰	$T*H*\dot{m}_a*\dot{m}_g$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۵	۶۰	$T*I*H*\dot{m}_g$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۶	۶۰	$\dot{m}_a*\dot{m}_g*I*H$
۰/۰۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۱۲۰	$T*H*I*\dot{m}_a*\dot{m}_g$

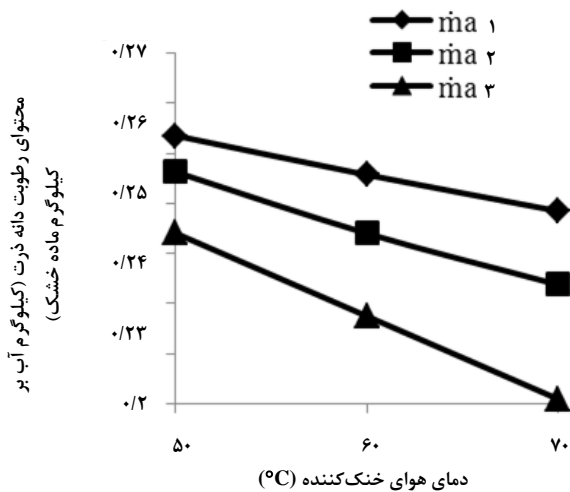
ns: No significant      \*\*: Significant at 0.99 level



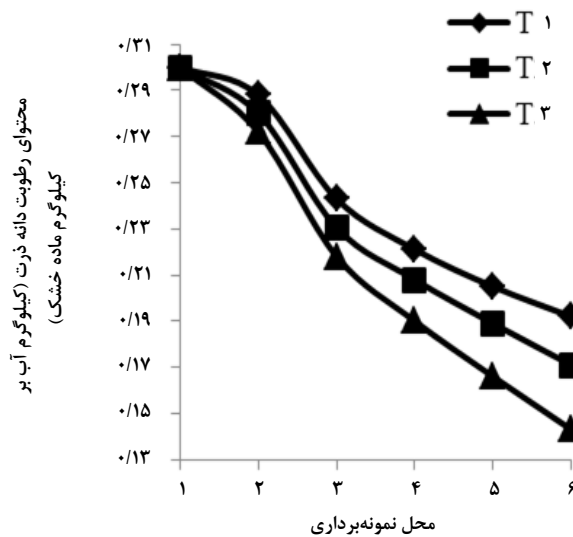
شکل ۴. آثار متقابل دمای هوای خشک‌کننده و نسبت کاربرد ذرات بی‌اثر



شکل ۲. آثار متقابل دمای هوای خشک‌کننده و آهنگ جریان جرمی محصول.



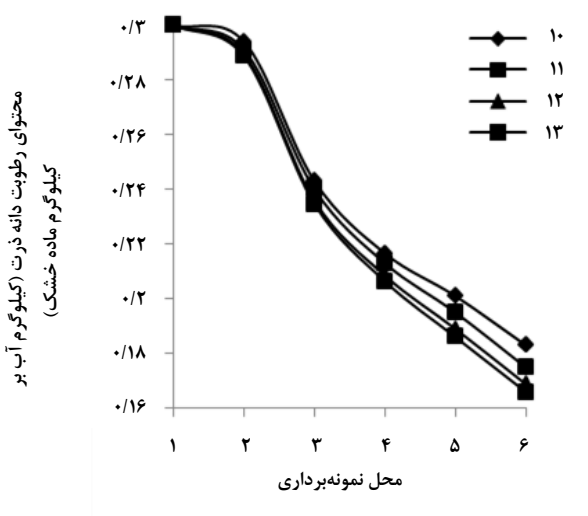
شکل ۵. آثار متقابل دمای هوای خشک‌کننده و آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده.



شکل ۳. آثار متقابل دمای هوای خشک‌کننده و محل نمونه‌برداری از مخزن.

عبوری از بستر محصول افزایش می‌یابد و موجب تهویه سریع‌تر هوای داخل خشک‌کن، و در نتیجه افت رطوبت نسبی هوای داخل مخزن خشک‌کن شده و بنابراین اثر افزایش دمای هوای خشک‌کننده بیشتر خواهد بود. به این ترتیب، می‌توان به راحتی نتیجه گرفت که به منظور افزایش اثر کاربرد دمای هوای خشک‌کننده بهتر است آهنگ جریان جرمی هوای عبوری از بستر خشک‌کن را نیز افزایش داد. بررسی اثر متقابل دو پارامتر آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده و ارتفاع نمونه‌برداری نشان داد که

نتایج آثار متقابل دو پارامتر دما و آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده حاکی از آن بود که با افزایش آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده، شیب منحنی‌های تغییرات رطوبت محصول برحسب دمای هوا زیادتر می‌شود (شکل (۵)). به بیان دیگر، اثر کاربرد دمای هوای خشک‌کننده در آهنگهای جریان جرمی بیشتر هوا افزایش می‌یابد. این امر را چنین می‌توان توجیه کرد که با افزایش آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده، حجم هوای

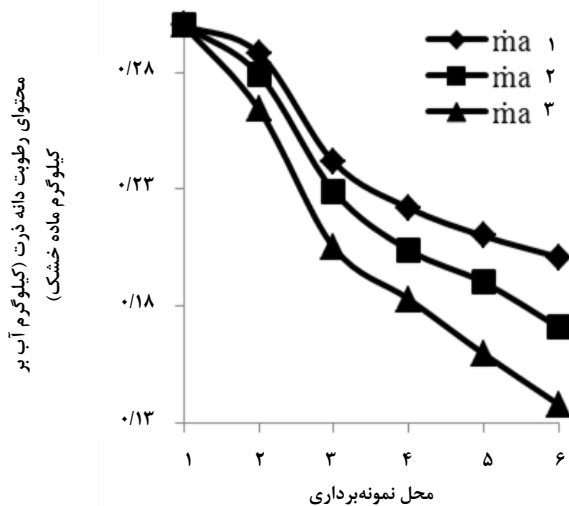


شکل ۷. آثار متقابل نسبت کاربرد ذرات بی اثر و محل نمونه برداری.

بررسی اثر متقابل دو پارامتر آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن خشک کن و ارتفاع نمونه برداری نشان داد که با کاهش ارتفاع نمونه برداری اثر کاربرد پارامتر آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن بیشتر شده است (شکل (۸)). این موضوع شاید به این علت باشد که مطابق شکل (۳)، در قسمت‌های پایین مخزن، تأثیر کاربرد دمای هوای خشک کننده بیشتر است و از سوی دیگر مطابق شکل (۲)، تأثیر استفاده از آهنگهای جریان جرمی خروجی کمتر دانه‌ها از مخزن در دماهای بالاتر افزایش می‌یابد. به این ترتیب، می‌توان پی برد که تأثیر بهره‌گیری از آهنگ جریان جرمی کمتر دانه‌ها در ارتفاع‌های کمتر مخزن (که دمای هوا در آنجا بیشتر است) بیشتر خواهد بود. به بیان دیگر، در قسمت‌های پایین مخزن، هوای خشک کننده گرم‌تر است، از این رو قرار گرفتن دانه‌ها طی مدت زمان بیشتر در معرض این هوای گرم، نسبت به حالتی که طی همان مدت زمان در معرض هوای با دمای کمتر (قسمت‌های بالای مخزن) باشد، مؤثرتر است. بنابراین، در آهنگهای جریان جرمی کمتر خروجی دانه از مخزن، اختلاف رطوبت در ارتفاع‌های مختلف مخزن، بیشتر است.

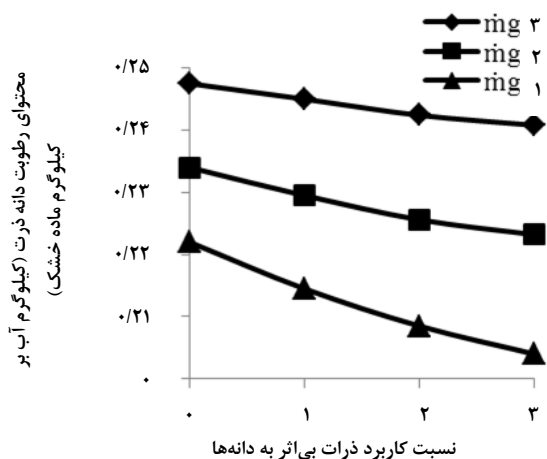
در شکل (۹)، اثر متقابل آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن و نسبت کاربرد ذرات بی اثر را مشاهده می‌کنید. مشاهده می‌شود که شیب منحنی‌های رطوبت محصول برحسب نسبت کاربرد ذرات بی اثر با کاهش آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن بیشتر شده است. به بیان دیگر در آهنگهای جریان جرمی کمتر خروجی

شیب منحنی‌های رطوبت محصول نسبت به محل نمونه برداری، با افزایش آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده بیشتر می‌شود (شکل (۶)). به بیان دیگر، با کاهش ارتفاع محل نمونه برداری اثر کاربرد آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده افزایش می‌یابد.

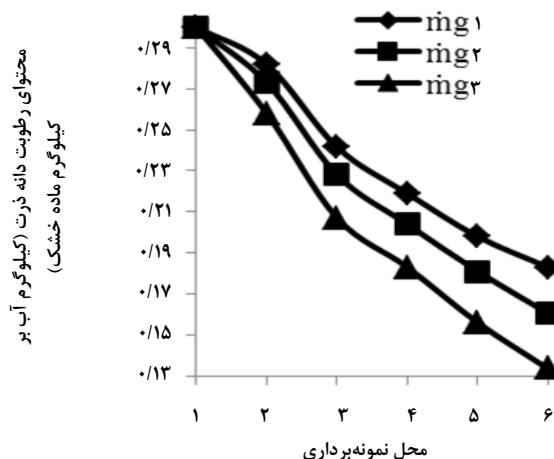


شکل ۶. آثار متقابل آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده و محل نمونه برداری.

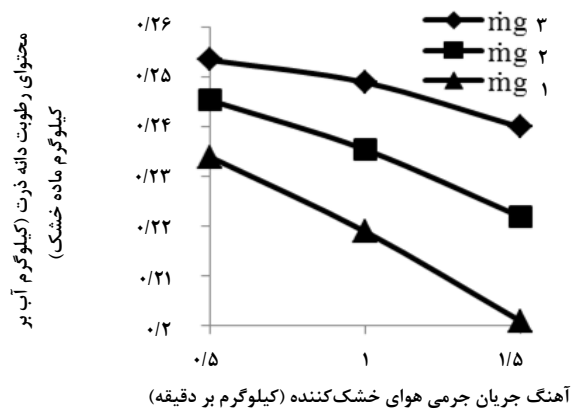
علت این امر شاید از این قرار باشد که در محل‌های پایین تر نمونه برداری، هوای خشک کننده به دلیل برخورداری از رطوبت نسبی کمتر دارای پتانسیل رطوبت گیری بیشتری است و بنابراین اثر کاربرد آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده در اعماق پایین تر مخزن بیشتر خواهد بود. در شکل (۷)، اثر متقابل نسبت‌های مختلف کاربرد ذرات بی اثر و ارتفاع نمونه برداری را مشاهده می‌کنید. همان گونه که مشاهده می‌شود، با کاهش ارتفاع نمونه برداری، تأثیر کاربرد ذرات بی اثر نیز بیشتر شده است که امری کاملاً طبیعی است، زیرا با کاهش ارتفاع نمونه برداری، دمای هوای خشک کننده زیادتر می‌شود و در نتیجه موجب تسریع در گرم شدن ذرات بی اثر و سرانجام خشک شدن زودتر دانه‌ها می‌شود. به بیان دیگر، همان گونه که در شکل (۳) نشان داده شد، با کاهش ارتفاع نمونه برداری اثر کاربرد دمای هوای خشک کننده بیشتر می‌شود. از سوی دیگر، مطابق شکل (۴)، تأثیر استفاده از ذرات بی اثر در دماهای بالاتر افزایش می‌یابد. بنابراین، به راحتی می‌توان نتیجه گرفت همان طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، تأثیر استفاده از ذرات بی اثر در ارتفاع‌های کم نمونه برداری افزایش می‌یابد.



شکل ۹. آثار متقابل آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن و نسبت کاربرد ذرات بی اثر.



شکل ۸. آثار متقابل آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن و محل نمونه برداری.



شکل ۱۰. آثار متقابل دو پارامتر آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده و آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن.

آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده بر نرخ خشک شدن دانه‌ها بیشتر خواهد شد.

بررسی اثر متقابل کاربرد ذرات بی اثر و آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده نشان داد که با افزایش آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده، شیب منحنی تغییرات رطوبت محصول بر حسب نسبت کاربرد ذرات بی اثر بیشتر می شود (شکل (۱۱)). به بیان دیگر، با افزایش آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده تأثیر کاربرد ذرات بی اثر بیشتر می شود. این پدیده را از این قرار می توان تفسیر کرد که از یک سو، افزایش آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده موجب بیشتر شدن تأثیر کاربرد پارامتر دمای هوا می شود (شکل (۵)) و از سوی دیگر، تأثیر استفاده از ذرات بی اثر در دماهای بالاتر هوای خشک کننده بیشتر خواهد بود (شکل (۴)). بنابراین، می توان

دانه از مخزن، تأثیر کاربرد ذرات بی اثر بیشتر خواهد بود. این موضوع می تواند به این دلیل باشد که از یک طرف تأثیر استفاده از ذرات بی اثر با افزایش دمای هوای خشک کننده روند صعودی دارد (شکل (۴)) و از سوی دیگر، تأثیر کاربرد دمای هوای خشک کننده با کاهش آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن افزایش نشان می دهد (شکل (۲)). بنابراین، می توان نتیجه گرفت که مطابق شکل (۹) تأثیر استفاده از ذرات بی اثر در آهنگهای کمتر جریان جرمی خروجی دانه بیشتر خواهد بود. همچنین، می توان از این قرار تفسیر کرد که به ازای آهنگهای جریان جرمی کمتر خروجی دانه از مخزن، مدت زمانی که ذرات بی اثر در معرض هوای خشک کننده قرار دارند، بیشتر می شود و از این رو به گرم شدن سریع تر ذرات بی اثر و در نهایت گرم شدن بیشتر دانه‌ها و افزایش آهنگ خشک شدن آنها خواهد انجامید.

در شکل (۱۰)، اثر متقابل پارامترهای آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده و آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن را مشاهده می کنید. مشاهده می شود که با کاهش آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن، شیب منحنی تغییرات رطوبت محصول بر حسب آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده افزایش می یابد. به بیان دیگر، با کاهش آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن، اثر کاربرد آهنگ جریان جرمی هوای خشک کننده بیشتر خواهد شد. این امر شاید از آن رو باشد که با کم شدن آهنگ جریان جرمی خروجی دانه از مخزن، مدت زمانی که دانه‌ها در معرض هوای خشک کننده قرار می گیرند، طولانی تر می شود و لذا اثر افزایش



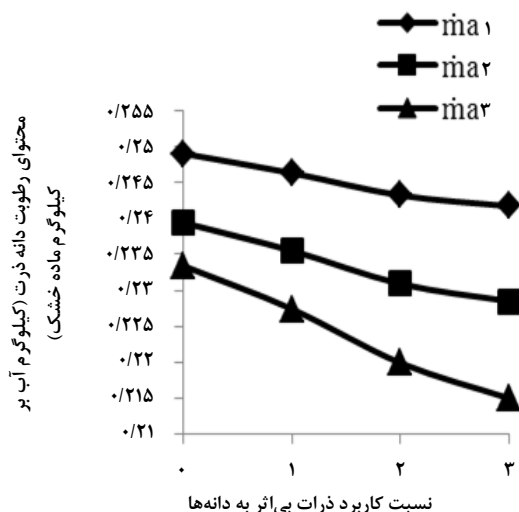
#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر، از یک خشک‌کن پیوسته که حاوی ذرات بی‌اثر حامل انرژی بود، برای فرایند خشک کردن دانه‌های ذرت استفاده شد. اثر عوامل گوناگونی چون آهنگ جریان جرمی دانه، آهنگ جریان جرمی و دمای هوای خشک‌کننده و نیز نسبت کاربرد ذرات بی‌اثر به دانه بر میانگین محتوای رطوبت دانه خروجی از مخزن بررسی شد. به منظور بررسی تأثیر عوامل یادشده بر محتوای رطوبت دانه‌های ذرت، تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش انجام شد که نتایج نشان داد با افزایش نسبت کاربرد ذرات بی‌اثر به دانه، آهنگ جریان جرمی و دمای هوای خشک‌کننده و کاهش آهنگ جریان جرمی محصول درون مخزن رطوبت محصول خروجی کمتر می‌شود. بنابراین، روش به کار رفته برای خشک کردن دانه‌های ذرت می‌تواند به منظور کاهش زمان خشک کردن محصول به کار گرفته شود.

#### مراجع

- [1] Zomorodian, A., Moradi, M., "Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for Cuminum Cyminum", Journal of Agricultural Science and Technology, 12, 401-408, (2010).
- [2] Zhang, K., You, C., "Numerical simulation of lignite drying in a packed moving bed dryer". Fuel Processing Technology, 110, 122-132, (2013).
- [3] Lacerda, A.F., Lisboa, M. H., Barrozo, M. A. S., "Heat and mass transfer in a countercurrent moving bed dryer", Applied Thermal Engineering, 25, 2641-2652, (2005).
- [4] Hong, L., Yangdong, H., Pei, Z., Lianying, W. U., Yangdong, L., "Simulation of co-current multi-effect drying system", Advanced Materials Research, 236, 808-813, (2011).
- [5] Hong, L., Lianying, W. U., Xianli, W. U., Yangdong, H. U., "Simulation of Countercurrent Multi-Effect Drying System", Advanced Materials Research, 2, 206-211, (2012).
- [6] Pfeifer, A. A., Murata, V. V., Barrozo, M. A. S., "Modelling of soybean seed drying in concurrent sliding bed dryers: Effect of the number of stages on the seed quality and drying performance", Biosystems Engineering, 107(4), 341-348, (2010).
- [7] Khatchatourian, O. A., Vielmo, H. A., Bortolaia, L. A., "Modelling and simulation of cross flow grain dryers" Biosystems Engineering, 116 (4), 335-345, (2013).
- [8] Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., Hall, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. The AVI publishing company, Inc, (1992).

نتیجه گرفت که با افزایش آهنگ جریان جرمی هوای عبوری از بستر، تأثیر کاربرد ذرات بی‌اثر بیشتر خواهد شد. همچنین، می‌توان گفت که با افزایش آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده، ضریب همرفتی هوا افزایش می‌یابد و موجب گرم شدن سریع‌تر ذرات بی‌اثر می‌شود و در نتیجه آهنگ خشک شدن افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۱. آثار متقابل آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده و نسبت کاربرد ذرات بی‌اثر به دانه‌های ذرت.

به این ترتیب، با توجه به شکل‌های (۲) تا (۱۱) و مطالب ذکرشده، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت خشک شدن (بر اساس طول مدت زمان خشک شدن) حالتی است که دما و آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده بیشترین مقدار، نسبت کاربرد ذرات بی‌اثر بالاترین نسبت و آهنگ جریان جرمی دانه‌های خروجی از مخزن کمترین مقدار باشد. در تحقیقی که یان و همکاران (۲۰۱۳) [۱۸] انجام دادند، بهترین حالت از لحاظ مدت زمان خشک شدن حالتی بود که سرعت و دمای هوای خشک‌کننده و نیز نسبت کاربرد ذرات بی‌اثر بیشترین مقدار باشد. همچنین، در تحقیق دیگری نتیجه گرفته شد که با افزایش کاربرد نسبت جرمی ذرات بی‌اثر از جنس فولاد و شیشه آهنگ خشک شدن افزایش می‌یابد [۱۹]. در تحقیق حاضر نیز حالتی که بیشترین نسبت کاربرد ذرات بی‌اثر به دانه (۳)، کمترین آهنگ جریان جرمی خروجی محصول (۰/۱۷ کیلوگرم بر دقیقه)، بالاترین دما (۷۰ درجه سلسیوس) و بیشترین آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده (۱/۵ کیلوگرم بر دقیقه) به عنوان سریع‌ترین حالت خشک شدن شناسایی و معرفی شد.

- [9] Lira, T. S., Murata, V. V., Barrozo, M.A.S., Assis, A. J., "Effect of radial air profiles on a countercurrent moving bed drying", *Food and Bioproducts Processing*, 85 (C3), 241–246, (2007).
- [10] Fellow, P. *Food Processing Technology*. Ellis Horwood, England, (1988).
- [11] Pabis, S., Jayas, D. S., Cenkowski, S. *Grain drying: theory and practice*, John Wiley press, (1998).
- [12] Hatamipour, M. H., Mowla, D., "Drying behavior of maize and green peas immersed in fluidized bed of inert energy carrier particles", *Food and Bioproducts Processing*, 84, No.C3, pp. 220–226, (2006).
- [13] Suravanichnirachorn, W., Haruthaithanasan, V., Suwonsichon, S., Sukatta, U., Maneeboon, T., Chantrapornchai, W., "Effect of carrier type and concentration on the properties, anthocyanins and antioxidant activity of freeze-dried mao [*Antidesma bunius* (L.) Spreng] powders", *Agriculture and Natural Resources*, in press, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.09.011>.
- [14] Guergoletto, K. B., Busanello, M., Garcia, S., "Influence of carrier agents on the survival of *Lactobacillus reuteri* LR92 and the physicochemical properties of fermented juçara pulp produced by spray drying", *LWT*, 80, 321-327, (2017).
- [15] Gonçalves, B. J., Lago, A. M. T., Machado, A. A., O., Giarola, T., Prado, J. V., Resende, "Infrared (IR) thermography applied in the freeze-drying of gelatin model solutions added with ethanol and carrier agents", *Journal of Food Engineering*, 221, 77-87, (2018).
- [16] Xu, D., Xu, Y., Liu, G., Hou, Z., Yuan, Y., Wang, S., Cao, Y., Sun, B., "Effect of carrier agents on the physical properties and morphology of spray-dried *Monascus* pigment powder", *LWT*, 98, 299-305, (2018).
- [17] Silva Costa, A. B., Bentes Freire, F., Freire, J. T., Ferreira, M. C., "Modelling drying pastes in vibrofluidized bed with inert particles", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 103, 1-11, (2016).
- [18] Yun, T. M., Puspasari, I., Tasirini, S. M., Talib, M. Z. M., "Drying of oil palm frond particles in a fluidized bed dryer with inert medium. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quality*", On Line- First Issue 00, 94-99, (2013).
- [19] Hatamipour, M. S., Mowla, D., "Experimental and theoretical investigation of drying of carrots in a fluidized bed with energy carrier", *Drying Technology*, 21 (1), 83–101, (2003).
- [20] Lee, D. H., Kim, S. D., "Mathematical model for batch drying in an inert medium fluidized bed", *Chem. Eng. Tech*, 22, 443–450, (1999).