



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی و ساخت خشک کن بستر سیال شلتوک برنج

نویسنده:

محمد علی وسدی

اساتید راهنما :

دکتر شهرام هاشمی مرغزار

دکتر محمود فرزانه گرد

تیرماه ۱۳۸۸





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه تبدیل انرژی

طراحی و ساخت خشک کن بستر سیال شلتوک برنج

دانشجو : محمد علی وسدی

استاد یا اساتید راهنما :
دکتر شهرام هاشمی مرغزار
دکتر محمود فرزانه گرد

استاد مشاور
دکتر عباس اکبرنیا

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۱۳۸۸/۴/۲۷

تاریخ: ۸۸/۵/۴

ویرایش:

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمدعلی وسدی رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان "طراحی و مدلسازی خشک کن بستر سیال شلتوک برنج" که در تاریخ ۱۳۸۸/۴/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> امتیاز (۱۶/۱۹)	قبول (با درجه: عالی)
--------------------------------	------------------------------------	--	----------------------

۲- بسیار خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۱- عالی (۱۸ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۲ - ۱۳/۹۹)

۳- خوب (۱۴ - ۱۵/۹۹)

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران (a)
	استاد ارشد	شهرام هاشمی مرغزار	۱- استاد راهنما
	دانشیار	محمود فرزانه گرد	۲- استاد راهنما
		عباس اکبرنیا	۳- استاد مشاور
		حمیدرضا ایبک چی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
		محمد محسن شاه مردان	۵- استاد ممتحن
		محمد حسن کیهانی	۶- استاد ممتحن

تأیید رئیس دانشکده:

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که اینجانب را در انجام و ارائه این تحقیق یاری نموده اند تشکر و قدردانی می نمایم:

از جناب آقای دکتر هاشمی مرغزار به جهت راهنمایی های ایشان در جهت انجام پایان نامه
از سرکار خانم مهندس اقتدار شهیدی، همسر گرامی ام، به جهت حمایت و کمک موثر ایشان در
طی مراحل انجام تحقیق

از جناب آقای دکتر اکبرنیا جهت همکاری در جهت ساخت دستگاه و انجام آزمایشها در پژوهشکده
کشاورزی سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران

از سرکار خانم مهندس خوشنویسان به جهت پیگیری مستمر و حمایت بی دریغ ایشان

از خانواده عزیزم به جهت شکیبایی شان طی مراحل تحصیل اینجانب
و همه عزیزانی که مرا در ارائه این پایان نامه یاری نمودند تشکر می کنم.

محمد علی وسدی

تیرماه ۱۳۸۸

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است. کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

محمد علی وسدی

تیرماه ۱۳۸۸

مقالات مستخرج از این پایان نامه

■ بررسی تجربی فرآیند سیال سازی شلتوک برنج، فصلنامه مکانیک شریف، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

امروزه بستر سیال به سبب ویژگی های متعدد آن بصورت گسترده در صنایع مختلف بکار گرفته می شود. یکی از کاربردهای عمده بستر سیال در صنایع مربوط به خشک کردن محصولات کشاورزی می باشد. به منظور تحقیق تجربی فرآیند خشک کردن بستر سیال شلتوک برنج دستگاهی طراحی و ساخته شد که بوسیله آن تاثیر پارامترهای موثر بر سیال سازی و خشک کردن شلتوک مورد بررسی قرار گرفت. بمنظور طراحی دستگاه ابتدا افت فشار و دبی مورد نیاز هوا در مراحل حداقل سیال سازی و انتقال دانه های شلتوک محاسبه شد. بیشترین افت فشار و دبی هوا بترتیب برابر $1826/87 \text{ pa}$ و $0/204 \text{ m}^3/\text{s}$ محاسبه و در طراحی اعمال گردید. برای ایجاد شرایط فوق یک دمنده سانتریفوژی با پره های جلوگرد باریک و با حداکثر دور 2760 U/min انتخاب شد. برای تامین هوای گرم یک کوره الکتریکی با 4 kW المنت 1 ، با مجموع توان 4000 وات ساخته و بکارگرفته شد. ساختمان دستگاه شامل یک محفظه استوانه‌ای شکل سیال سازی به ابعاد $0/20 \times 0/45 \text{ m}$ ، یک محفظه یکنواخت کننده هوا به ابعاد $0/20 \times 0/90 \text{ m}$ ، یک صفحه توزیع کننده با ضخامت $0/01 \text{ m}$ و قطر سوراخهای $0/03 \text{ m}$ و یک شاسی که به منظور استقرار مناسب محفظه های خشک کن طراحی و ساخته شد.

بمنظور بررسی شرایط سیال سازی و تعیین منحنی های مربوط به آن آزمایشها در ارتفاع بستر های $0/04$ ، $0/05$ ، $0/06$ ، $0/07$ و $0/08 \text{ m}$ انجام شد و سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن ثبت گردید. برای بررسی تاثیر دمای هوای ورودی بر فرآیند های سیال سازی و خشک کردن، آزمایشها برای هوای ورودی با دمای 21 ، 40 ، 50 ، 60 و $80 \text{ }^\circ\text{C}$ انجام گردید. این آزمایشها با شلتوک در رطوبت های اولیه $35/21\%$ ، $38/25\%$ ، $39/07\%$ ، $43/3\%$ و $43/92\%$ تکرار شد. همچنین با اعمال شرایط بستر ثابت، حداقل سیال سازی و سیال کامل در سرعت های $0/8$ ، $1/85$ و $2/7 \text{ m/s}$ ، تاثیر سرعت هوای ورودی بر فرآیند خشک کردن نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که با افزایش ارتفاع بستر مواد، افت فشار بستر افزایش می یابد، حال آنکه سرعت حداقل سیال سازی مستقل از ارتفاع بستر می باشد. هرچه عمق بستر مواد بیشتر باشد غیر یکنواختی فرآیند خشک کردن افزایش می یابد. افزایش دمای هوای ورودی موجب افزایش افت فشار بستر و سرعت حداقل سیال سازی می گردد. همچنین با افزایش دمای هوای خشک کننده زمان خشک کردن کاهش می یابد. زمان خشک کردن در شرایط حداقل سیال سازی کمترین مقدار و در شرایط بستر ثابت بیشترین مقدار بدست آمد. همچنین توزیع رطوبت در ارتفاع بسترهای مورد آزمایش در شرایط حداقل سیال سازی و بستر سیال یکنواخت بوده در حالیکه در شرایط بستر ثابت یکنواخت نمی باشد.

واژه های کلیدی: بستر سیال، خشک کن، کمینه سرعت سیال سازی، افت فشار بستر، شلتوک

فصل اول مقدمه و هدف

۲	۱-۱ مقدمه.....
۴	۲-۱ هدف.....
۵	۳-۱ خشک کردن و انواع روشهای آن.....
۶	۴-۱ انواع خشک کن ها.....
۸	۱-۴-۱ خشک کن های مستقیم.....
۹	۲-۴-۱ خشک کن های غیر مستقیم.....
۹	۵-۱ خشک کن بستر سیال.....
۹	۱-۵-۱ اصول عملیاتی و کاربردها.....
۱۱	۲-۵-۱ مزایا و معایب بکارگیری خشک کن بستر سیال.....
۱۱	۶-۱ خشک کردن دانه ها.....
۱۲	۷-۱ شلتوک برنج.....

فصل دوم مفاهیم پایه

۱۶	۱-۲ سیال سازی.....
۱۷	۲-۲ خشک کردن.....
۱۷	۱-۲-۲ مفاهیم اولیه.....
۱۹	۲-۲-۲ سینتیک خشک کردن.....
۲۰	۱-۲-۲-۲ خشک کردن با نرخ ثابت.....
۲۰	۲-۲-۲-۲ خشک کردن با نرخ نزولی.....
۲۲	۳-۲-۲ زمان خشک کردن.....
۲۳	۳-۲ اصول طراحی خشک کن ها.....
۲۴	۴-۲ عوامل موثر در طراحی خشک کن بستر سیال.....
۲۴	۱-۴-۲ کمینه سرعت سیال سازی.....
۲۵	۲-۴-۲ سرعت حامل.....

۲۵	<u>۳-۴-۲ افت فشار در بستر</u>
۲۵	<u>۴-۴-۲ ارتفاع بستر</u>
۲۶	<u>۵-۴-۲ توزیع کننده گاز</u>
۲۷	<u>۶-۴-۲ رطوبت اولیه</u>
۲۷	<u>۵-۲ خواص دانه ها</u>
۲۸	<u>۱-۵-۲ ویژگی های فیزیکی</u>
۲۸	<u>۱-۱-۵-۲ حجم</u>
۲۸	<u>۲-۱-۵-۲ کرویت</u>
۳۰	<u>۳-۱-۵-۲ جرم مخصوص</u>
۳۰	<u>۴-۱-۵-۲ تخلخل</u>
۳۱	<u>۲-۵-۲ ویژگی های حرارتی</u>
۳۱	<u>۱-۲-۵-۲ گرمای ویژه</u>
۳۲	<u>۲-۲-۵-۲ هدایت گرمایی</u>
۳۲	<u>۳-۲-۵-۲ انتشار گرما</u>
۳۳	<u>۴-۲-۵-۲ ضریب انتقال حرارت جابجایی</u>
۳۵	<u>۳-۵-۲ مقاومت در برابر شکستگی</u>
۳۶	<u>۶-۲ بررسی تحقیقات پیشین</u>
فصل سوم طراحی و ساخت	
۴۶	<u>۱-۳ سرعت حداقل سیال سازی</u>
۴۹	<u>۲-۳ سرعت حامل</u>
۵۰	<u>۳-۳ افت فشار بستر ثابت</u>
۵۱	<u>۴-۳ ساختمان خشک کن</u>
۵۱	<u>۱-۴-۳ ابعاد محفظه خشک کن</u>
۵۳	<u>۲-۴-۳ دمنده</u>
۵۴	<u>۳-۴-۳ صفحه توزیع کننده</u>
۵۶	<u>۴-۴-۳ کوره حرارتی</u>

۵۷۵-۴-۳ محفظه یکنواخت ساز هوا.

۵۷۶-۴-۳ شاسی

فصل چهارم آزمایش و اندازه گیری

۵۹۱-۴ آزمایشهای انجام شده.

۵۹۱-۱-۴ اندازه گیری افت فشار ناشی از صفحه توزیع کننده

۶۰۲-۱-۴ منحنی سیال سازی

۶۰۱-۲-۱-۴ بررسی تاثیر عمق بستر مواد در منحنی سیال سازی

۶۱۲-۲-۱-۴ بررسی تاثیر دمای هوای ورودی بر منحنی سیال سازی

۶۱۳-۲-۱-۴ بررسی تاثیر رطوبت اولیه مواد بر منحنی سیال سازی

۶۱۳-۱-۴ سینتیک خشک کردن

۶۳۱-۳-۱-۴ تاثیر ارتفاع بستر در سینتیک خشک کردن

۶۳۲-۳-۱-۴ تاثیر رطوبت اولیه مواد در سینتیک خشک کردن

۶۳۲-۴ روش های تعیین کمیت های مربوطه

۶۳۱-۲-۴ تعیین خواص فیزیکی موثر دانه ها

۶۵۲-۲-۴ تعیین میزان رطوبت دانه ها

۶۶۳-۲-۴ آماده کردن شلتوک با رطوبت های مختلف

۶۶۴-۲-۴ تعیین ویژگی های هوای خروجی دمنده

۶۷۳-۴ ابزار اندازه گیری پارامترهای موثر بر سیال سازی

۶۷۱-۳-۴ دما

۶۸۲-۳-۴ فشار

۶۸۳-۳-۴ سرعت

فصل پنجم بحث و نتیجه گیری

۷۱۱-۵ سیال سازی

۷۱۱-۱-۵ افت فشار صفحه توزیع کننده

۷۵	۲-۱-۵ افت فشار بستر مواد
۷۵	۱-۲-۱-۵ تاثیر ارتفاع بستر در منحنی سیال سازی
۸۲	۲-۲-۱-۵ تاثیر دمای هوای ورودی بر منحنی سیال سازی
۸۹	۳-۲-۱-۵ تاثیر رطوبت اولیه دانه ها بر منحنی سیال سازی
۹۳	۲-۵ سینتیک خشک کردن
۹۳	۱-۲-۵ تاثیر ارتفاع بستر مواد بر سینتیک خشک کردن
۹۹	۲-۲-۵ تاثیر دمای هوای ورودی بر سینتیک خشک کردن
۱۰۴	۳-۲-۵ تاثیر سرعت هوا بر سینتیک خشک کردن
۱۰۷	۴-۲-۵ تاثیر رطوبت اولیه شلتوک بر سینتیک خشک کردن

فصل ششم جمع بندی و پیشنهادات

۱۱۲	۱-۶ مشخصات کلی دستگاه ساخته شده
۱۱۳	۲-۶ فرآیند سیال سازی
۱۱۴	۱-۲-۶ افت فشار صفحه توزیع کننده
۱۱۴	۳-۲-۶ سرعت حداقل سیال سازی
۱۱۵	۳-۶ سینتیک خشک کردن
۱۱۶	۴-۶ پیشنهادات
۱۱۷	مراجع
۱۲۰	پیوست ها

فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

شکل ۱-۱ الگوی جریان در خشک کن ها	۸
شکل ۲-۱ خشک کن های با جریان متقاطع و ترکیبی	۸
شکل ۱-۲ مراحل مختلف سیال سازی	۱۷
شکل ۲-۲ منحنی خشک کردن	۲۰
شکل ۳-۲ منحنی شدت خشک شدن	۲۱
شکل ۴-۲ منحنی سیالی شدن	۲۴
شکل ۵-۲ شماتیک خشک کن بستر سیال ساخته شده توسط Inaba و همکاران	۳۶
شکل ۶-۲ خشک کن بستر سیال ساخته شده برای خشک کردن گندم بهاره قرمز (Dimatia)	۳۹
شکل ۱-۳ شماتیک ساختمان دستگاه طراحی شده	۵۳
شکل ۱-۴ منحنی افت فشار صفحه توزیع کننده	۶۰
شکل ۲-۴ نمای کلی نحوه کاربرد دماسنج دیجیتالی و محل نصب سنسورهای آن	۶۷
شکل ۳-۴ نمای کلی نحوه کاربرد مانومتر و محل نصب لوله های آن	۶۸
شکل ۴-۴ نمای کلی سرعت سنج و سنسور مربوط به آن	۶۹
شکل ۱-۵ منحنی افت فشار توزیع کننده در دماهای مختلف	۷۱
شکل ۲-۵ منحنی های حاصل از رگراسیون داده های آزمایشگاهی افت فشار توزیع کننده	۷۲
شکل ۳-۵ منحنی های افت فشار توزیع کننده حاصل از رابطه Davidson و Harrison	۷۴
شکل ۴-۵ منحنی های افت فشار توزیع کننده بدست آمده از رابطه کریزی و کورشی	۷۴
شکل ۵-۵ افت فشار بستر مواد در ارتفاع بسترهای مختلف، دمای هوای ورودی 21°C (محیط آزمایشگاه) و رطوبت اولیه $23/33\%$ بر پایه خشک	۷۶
شکل ۶-۵ منحنی های بی بعد افت فشار بستر مواد در ارتفاع بستر های مختلف	۷۷
شکل ۷-۵ سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن در ارتفاع بستر های مختلف، با هوای ورودی 21°C و رطوبت اولیه $23/33\%$	۷۸
شکل ۸-۵ مقایسه سرعت حداقل سیال سازی بدست آمده از آزمایش و روابط تئوری	۸۰
شکل ۹-۵ منحنی های افت فشار بدست آمده از (a) رابطه Ergun (b) رابطه Carmen و Kozeny، در ارتفاع بستر های مختلف و دمای هوای 21°C	۸۰
شکل ۱۰-۵ مقایسه منحنی های افت فشار بستر مواد حاصل از روابط موجود و داده های حاصل از آزمایش در ارتفاع بستر های مختلف، با هوای ورودی 21°C	۸۱
شکل ۱۱-۵ منحنی های افت فشار بستر مواد حاصل از آزمایش در دماهای مختلف	۸۳

شکل ۵-۱۲ مقایسه مقادیر سرعت حداقل سیال سازی بدست آمده از روابط موجود در دماهای مختلف.....	۸۴
شکل ۵-۱۳ منحنی های افت فشار بی بعد بستر مواد در دما ها و ارتفاع بستر های مختلف.....	۸۵
شکل ۵-۱۴ افت فشار بستر مواد در شرایط حداقل سیال سازی برای دماهای مختلف در ارتفاع بستر های متفاوت.....	۸۶
شکل ۵-۱۵ منحنی های افت فشار بدست آمده از روابط Ergun (a) و Kozeny-Carmen (b) برای دما های هوای مختلف در ارتفاع بستر های متفاوت.....	۸۷
شکل ۵-۱۶ مقایسه منحنی های افت فشار بدست آمده از آزمایش و روابط Ergun و Kozeny-Carmen برای ارتفاع بستر های متفاوت در دما های هوای (a) $T=50^{\circ}\text{C}$ و (b) $T=80^{\circ}\text{C}$	۸۸
شکل ۵-۱۷ منحنی های افت فشار بستر مواد در رطوبت های اولیه مختلف شلتوک در ارتفاع بستر های ۴، ۶ و ۸ cm.....	۹۰
شکل ۵-۱۸ منحنی های افت فشار بی بعد بستر مواد با رطوبت های اولیه مختلف، در ارتفاع بستر های ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ m.....	۹۱
شکل ۵-۱۹ مقایسه بین منحنی های افت فشار در رطوبت های مختلف با منحنی حاصل از رابطه Kozeny-Carmen در ارتفاع بستر های مختلف.....	۹۲
شکل ۵-۲۰ منحنی های خشک کردن شلتوک با رطوبت اولیه ۳۸/۲۵٪، در ارتفاع بستر های مختلف در سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s و دمای هوای 60°C	۹۳
شکل ۵-۲۱ منحنی های مربوط به کاهش رطوبت از ۳۸/۲۵٪ به ۲۳٪ بر پایه خشک، در ارتفاع بستر های مختلف، در سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s.....	۹۴
شکل ۵-۲۲ مقایسه منحنی های سینتیک خشک کردن در سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s در ارتفاع بستر های مختلف، دمای هوای 60°C و رطوبت اولیه ۳۸/۲۵٪.....	۹۵
شکل ۵-۲۳ نمودارهای زمان خشک کردن در ارتفاع بستر های مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال.....	۹۵
شکل ۵-۲۴ منحنی های نرخ خشک کردن برای ارتفاع بستر های مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال.....	۹۶
شکل ۵-۲۵ منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در عمق بستر های مختلف.....	۹۷
شکل ۵-۲۶ منحنی های اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال.....	۹۸
شکل ۵-۲۷ منحنی های مربوط به دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال.....	۹۹
شکل ۵-۲۸ منحنی های خشک کردن شلتوک با رطوبت اولیه ۴۳/۳٪ در ارتفاع بستر ۰/۰۶m با دماهای هوای مختلف در سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s.....	۹۹

شکل ۵-۲۹ مقایسه منحنی های خشک کردن در دو حالت بستر ثابت و بستر سیال در دماهای هوای ورودی مختلف..... ۱۰۰

شکل ۵-۳۰ منحنی های نرخ خشک کردن دماهای مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال..... ۱۰۱

شکل ۵-۳۱ مدت زمان خشک کردن برای کاهش رطوبت از محتوای رطوبت $\frac{43}{3}\%$ تا $\frac{30}{3}\%$ (۰.۳۰٪ کاهش)، در شرایط بستر ثابت و بستر سیال در دماهای مختلف هوای ورودی..... ۱۰۲

شکل ۵-۳۲ منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در دماهای مختلف..... ۱۰۲

شکل ۵-۳۳ منحنی های اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال..... ۱۰۳

شکل ۵-۳۴ منحنی های مربوط به دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال..... ۱۰۴

شکل ۵-۳۵ منحنی های خشک کردن شلتوک با سرعت های هوای ورودی مختلف..... ۱۰۴

شکل ۵-۳۶ نمودار زمان خشک کردن در سرعت های هوای ورودی مختلف..... ۱۰۵

شکل ۵-۳۷ منحنی های نرخ خشک کردن در سرعت های مختلف..... ۱۰۵

شکل ۵-۳۸ منحنی بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در سرعت های مختلف..... ۱۰۶

شکل ۵-۳۹ منحنی های (a) اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی و (b) دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن..... ۱۰۷

شکل ۵-۴۰ منحنی های خشک کردن شلتوک با رطوبت اولیه های مختلف در ارتفاع بستر 0.06 m و سرعت های 0.18 و 1.85 m/s ۱۰۷

شکل ۵-۴۱ مقایسه منحنی های خشک کردن برای رطوبت های اولیه مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال..... ۱۰۸

شکل ۵-۴۲ نمودار زمان خشک کردن برای کاهش 40% محتوای رطوبت از نمونه های شلتوک با رطوبت اولیه های مختلف..... ۱۰۹

شکل ۵-۴۳ منحنی های نرخ خشک کردن برای شلتوک با رطوبت اولیه های مختلف در شرایط بستر سیال و بستر ثابت..... ۱۰۹

شکل ۵-۴۴ منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال برای رطوبت های اولیه مختلف شلتوک..... ۱۱۰

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲ جرم ۱۰۰۰ دانه برای برخی از دانه های غلات.....	۲۹
جدول ۲-۲ گرمای ویژه خشک برخی از بذر ها.....	۳۲
جدول ۳-۲ معادلات مربوط به محاسبه انتشار حرارت در برخی از دانه های غلات به شکل توده ای	۳۳
جدول ۴-۲ معادلات مربوط به محاسبه عدد ناسلت.....	۳۴
جدول ۵-۲ تحقیقات انجام شده بر روی خشک کن بستر سیال دانه های نباتی.....	۴۴
جدول ۱-۳ مقادیر کمینه سرعت سیال سازی بدست آمده از روابط موجود، در دمای هوای محیط (۲۱ °C).....	۴۸
جدول ۲-۳ مقادیر سرعت حامل بدست آمده از روابط موجود، در دمای هوای محیط (۲۱ °C).....	۵۰
جدول ۳-۳ مقادیر افت فشار بدست آمده از روابط تئوری در ارتفاع بستر های مختلف، دمای هوای ۲۱ °C.....	۵۱
جدول ۴-۳ مقادیر افت فشار صفحه توزیع کننده بدست آمده از روابط موجود.....	۵۵
جدول ۵-۳ انتخاب مقادیر مناسب ضریب منفذ بر حسب عدد رینولدز.....	۵۶
جدول ۱-۵ مقادیر K بدست آمده از میانبایی افت فشار توزیع کننده.....	۷۲
جدول ۲-۵ روابط تئوری موجود برای افت فشار توزیع کننده.....	۷۳
جدول ۳-۵ مقایسه مقادیر بدست آمده از رابطه Brauer و Mewes و مقادیر حاصل از آزمایش در دمای ۲۱°C.....	۷۳
جدول ۴-۵ اختلاف مقادیر افت فشار توزیع کننده بدست آمده از رابطه کریزی و کورشی با داده های حاصل از آزمایش.....	۷۵
جدول ۵-۵ مقادیر سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن در ارتفاع بستر های مختلف.....	۷۸
جدول ۶-۵ خلاصه روابط ارائه شده برای تعیین حداقل سرعت سیال سازی.....	۷۹
جدول ۷-۵ مقادیر سرعت حداقل سیال سازی بدست آمده از روابط موجود.....	۷۹
جدول ۸-۵ روابط موجود برای تعیین افت فشار بستر مواد.....	۸۰
جدول ۹-۵ مقادیر سرعت حداقل سیال سازی بدست آمده از روابط موجود در دماهای مختلف.....	۸۲
جدول ۱۰-۵ مقایسه مقادیر حداقل سرعت سیال سازی بدست آمده از رابطه Acrov و Todes با داده های حاصل از آزمایش در دماهای مختلف.....	۸۴
جدول ۱۱-۵ مقایسه بین مقادیر افت فشار بستر مواد حاصل از نتایج آزمایشگاهی و رابطه Carmen-Kozeny.....	۸۹

جدول ۵-۱۲	مقادیر بدست آمده سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن برای رطوبت های مختلف.....	۸۹
جدول ۵-۱۳	اختلاف منحنی های حاصل از آزمایش و رابطه Kozeny-Carmen.....	۹۳
جدول ۵-۱۴	مدت زمان لازم برای کاهش رطوبت از ۳۸/۲۵٪ به ۲۳٪ بر پایه خشک، در ارتفاع بستر های مختلف و در شرایط بستر ثابت و بستر سیال.....	۹۴
جدول ۵-۱۵	مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در ارتفاع بستر های مختلف و سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s.....	۹۷
جدول ۵-۱۶	مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در دماهای مختلف و سرعت های ۰/۸ و m/s ۱/۸۵.....	۱۰۳
جدول ۵-۱۷	مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در سرعت های مختلف.....	۱۰۶
جدول ۵-۱۸	مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در رطوبت های مختلف و سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s.....	۱۱۰

۱۲۱	پیوست ۱ محدوده ابعاد برخی از دانه ها
۱۲۱	پیوست ۲ معادلات برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی برخی از دانه های غلات
۱۲۲	پیوست ۳ نمای اجزاء ساختمان دستگاه و تجهیزات آن
۱۲۴	پیوست ۴ تجهیزات آزمایشگاهی
۱۲۶	پیوست ۵ ویژگی های فیزیکی دانه شلتوک
۱۲۶	پیوست ۶ استاندارد تعیین میزان رطوبت
۱۲۶	پیوست ۷ نمودار سایکرومتریک
۱۲۷	پیوست ۸ مرحله بستر ثابت
۱۲۷	پیوست ۹ ستون های ناشی از حرکت حباب های هوا که به صورت تصادفی در نقاط مختلف بستر ایجاد می شوند
۱۲۸	پیوست ۱۰ مرحله بستر سیال

فهرست علائم اختصاری

نماد	عنوان
X	مقدار رطوبت بر پایه خشک
X'	مقدار رطوبت بر پایه تر
m	جرم
T	دما
const.	مقدار ثابت
W_D	نرخ خشک کردن
A	سطح
t	زمان
Y	رطوبت مطلق هوا
U	سرعت
Δp	افت فشار
L	ارتفاع بستر مواد
ε	تخلخل
μ	چسبندگی دینامیکی
d	قطر
ψ	ضریب کروییت
β	درجه آزادی
ρ	دانسیته
b	ضخامت صفحه توزیع کننده
s	فاصله بین محورهای سوراخها
K_s	ثابت هندسی
V	حجم
Re	عدد رینولدز
C	گرمای ویژه

k	رسانایی گرمایی
α	انتشار گرمایی
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرنتل
F	نیرو
η	ویسکوزیته
Ar	عدد ارشمیدس
ξ	ضریب اصطکاک داخلی ذرات
v	حجم مخصوص
p	فشار
C_o	ضریب منفذ
n_o	تعداد سوراخها در واحد سطح صفحه توزیع کننده
E_h	توان حرارتی
C_D	ضریب درگ

فهرست اندیس ها

نماد	عنوان
s	ماده خشک
cr	شرایط بحرانی
eq	شرایط تعادلی
O	سوراخ
wb	حباب تر
d	توزیع کننده
g	گاز(هوا)
mf	شرایط کمینه سیال سازی
gt	حامل
p	ذرات
b	بستر
e	معادل
k	دانه
dy	دینامیکی
st	استاتیکی
w	ماده مرطوب
db	پایه ماده خشک
v	بخار
gs	هوای خشک
amb	محیط

فصل اول

مقدمه و هدف

۱-۱ مقدمه

خشک کردن عبارت است از مجموعه اقداماتی که برای از بین بردن تمام یا مقدار معینی آب یا حلال، از ماده جامد انجام می شود. بطور کلی می توان گفت فرآیند خشک کردن جامدات یک فرآیند انتقال حرارتی می باشد. به عنوان مثال عبور یک جریان گاز (مثلاً هوا) با دمای بالا، گرمای مورد نیاز در فرآیند انتقال حرارت جابه جایی را تامین کرده و با عبور از بستر مواد جامد، رطوبت آنها را جذب و از محیط خارج می کند.

امروزه خشک کردن امری ضروری برای انجام فرآیند ذخیره سازی به شمار می رود که در زمینه های وسیعی کاربرد دارد. کاربردهایی نظیر خشک کردن بلورهای نمک و حذف حلال از یک ورق پلیمر، تا صنایع مربوط به کشاورزی و صنایع غذایی. سالانه صدها میلیون تن گندم، ذرت، برنج، جو و دیگر دانه های نباتی مانند ذرت خوشه ای، دانه های آفتابگردان، عدس و ... بوسیله خشک کن ها، خشک و آماده ذخیره سازی می گردد. برای جلوگیری از واکنشهای مخرب، رشد میکروبهها، حشرات و کرمهای ریز باید محصولات را در شرایط خاص از لحاظ دما و رطوبت نگهداری کرد. به عبارت دیگر محتوای رطوبت و دمای دانه ها باید برای ذخیره سازی مناسب باشد. به طور کلی میزان رطوبت و دمای مناسب برای ذخیره سازی هر محصول، بستگی مستقیم به نوع و کاربرد آن دارد. با توجه به مطالب فوق، خشک کردن یکی از مهمترین مراحل تولید غلات بشمار می رود. طبق تحقیقات صورت گرفته، مهمترین عامل ضایعات محصولات دانه ای خشک کردن نادرست می باشد. خشک کردن سریع غلات با دمای بالا، به علت تنش های حرارتی ایجاد شده سبب ترک خوردگی محصولات می شود.

مشکل اساسی خشک کن های موجود در صنایع وابسته به کشاورزی در ایران، عدم توزیع یکنواخت حرارت در خشک کن و در نتیجه غیر یکنواخت خشک کردن محصولات کشاورزی می باشد. در نتیجه مشکلاتی را در بخش ذخیره سازی محصولات و عملیات پس از برداشت بوجود می آورد و سالانه خسارات زیادی را در این بخش متوجه کشاورزان و بالطبع اقتصاد کشور می

نماید. از آن جمله می توان به نحوه خشک کردن برنج و چای در شمال کشور اشاره کرد که استفاده از روشهای سنتی و قدیمی باعث افزایش ضایعات و افت کیفیت و فساد زود هنگام محصولات تولیدی می شود [۱].

برنج گیاهی است که به علت نیاز زیادی که اغلب مردم جهان به آن دارند در بین غلات، بعد از گندم، در سطح بسیار وسیعی از زمین های زراعتی کشور های مختلف جهان کشت می شود. کشور ما نیز با تولید حدود ۲/۸ میلیون تن شلتوک و وجود بیش از ۴۰۰۰ واحد شالی در استانهای مختلف، پتانسیل مناسبی برای فرآوری و تولید این محصول دارد. متأسفانه در شرایط کنونی به دلیل عدم وجود تکنولوژی و تجهیزات مناسب و مدرن در روند تولید برنج، دانه آن دچار خسارات کمی و کیفی فراوان می شود. طبق مطالعات انجام گرفته توسط سازمان جهاد کشاورزی استان گیلان در سال ۱۳۷۵ از هر ۱۰۰ کیلوگرم شلتوک ۵۲ کیلوگرم برنج سالم به دست می آید و ۴۸ درصد بقیه شامل ۱۵/۵ تا ۲۹ درصد پوسته شلتوک و ۸ تا ۱۷ درصد سبوس و گرد سبوس، ۴ درصد خرده برنج و ۱۴ درصد برنج نیم دانه است [۲]. یکی از راه های کاهش ضایعات برنج، خشک کردن شلتوک تا میزان رطوبت مناسب می باشد. خشک کردن به روشهای سنتی (زیر آفتاب) و یا بکارگیری خشک کن های سیلویی که سبب عدم یکنواختی در خشک کردن و یا خشک کردن تا رطوبت نامناسب می شوند، موجب تلفات بیش از حد و مخصوصاً خرد شدن بیش از معمول برنج می گردد.

مزایای خشک کردن محصولات کشاورزی بوسیله خشک کن ها عبارتند از:

۱- افزایش دوره ذخیره سازی و کاهش ضایعات ناشی از عوامل فساد محصولات نظیر مخمرها، کپک ها و غیره.

۲- کاهش زمان خشک کردن در مقایسه با خشک کردن با روشهای طبیعی

۳- امکان برداشت زودتر از موعد، که به این ترتیب می توان تلفات مزرعه ای محصولات، ناشی از نامناسب بودن شرایط آب و هوا و ریزش دانه ها را کاهش داد.

۴- کاهش ضایعات محصولات، ترک خوردگی و شکستگی دانه ها، در مقایسه با روشهای خشک

کردن طبیعی

در میان روشهای جدید خشک کردن، روش بستر سیال از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از جمله مزیت های این روش می توان به اختلاط یکنواخت مواد در محفظه خشک کن و شرایط بسیار کارای انتقال حرارت و جرم اشاره کرد. به سبب ویژگیها و محدودیت های عملیاتی، بکارگیری این نوع خشک کن برای مواد دانه ای مناسب تر می باشد. با این حال این روش قابلیت خشک کردن محلول ها را نیز دارد. با استفاده از خشک کردن بستر سیال می توان مقادیر قابل توجهی تلفات ناشی از خشک کردن را کاهش داد.

۱-۲ هدف

به دلیل فرسودگی و غیر استاندارد بودن تجهیزات فرآوری برنج، شلتوک دچار خسارات و ضایعات کیفی و کمی فراوان می گردد، به صورتی که میزان برنج شکسته از دو برابر استاندارد جهانی (FAO) بالاتر می باشد [۲]. با توجه به واردات هر ساله برنج سفید برای جبران کمبود برنج مصرفی در کشور و با عنایت به برنامه های اقتصادی کشور مبنی بر افزایش تولید در این بخش، لزوم کاهش ضایعات برنج در واحد های شالی کوبی کشور، امری ضروری، حیاتی و اجتناب ناپذیر می باشد. بر این اساس و با توجه به اینکه در فرآیند تولید برنج، ماشینهای پوست کن، سفید کن و خشک کن از نقاط بحرانی محسوب شده و نیازمند باز سازی و بکارگیری روشها و تجهیزات پیشرفته هستند، اصلاح خشک کن های موجود با هدف حفظ کیفیت دانه برنج و کاهش ضایعات آن، کاهش مصرف سوخت و هزینه ها، امری حیاتی می باشد.

با توجه به مزیت های ذکر شده برای خشک کن های بستر سیال و از آنجایی که اکثر محصولات کشاورزی دانه ای دارای مشخصه های مورد نظر برای استفاده در خشک کن بستر سیال هستند، این نوع خشک کن برای طراحی و ساخت انتخاب شد.

با توجه به مطالب مذکور اهداف این تحقیق عبارتند از:

۱- طراحی و ساخت دستگاه خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی شلتوک برنج و انجام محاسبات

مربوط به آن

۲- بررسی مراحل سیال سازی و مقایسه نتایج حاصل از محاسبات تئوری و نتایج آزمایشگاهی

۳- بررسی سینتیک خشک کردن بستر سیال شلتوک برنج و مقایسه نتایج حاصل از محاسبات

تئوری و نتایج آزمایشگاهی

۱-۳ خشک کردن و انواع روشهای آن

امروزه روشهای مختلفی برای خشک کردن مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک روش متعارف استفاده از جریان گاز، مثلاً هوا است. هوای گرم شده گرمای مورد نیاز در فرآیند انتقال حرارت جابه‌جایی را تامین کرده و در نهایت به صورت بخار مرطوب خارج می‌شود. روش دیگر استفاده از خشک کردن مکشی می‌باشد. به این شکل که گرمای مورد نظر به وسیله انتقال حرارت رسانشی یا انعکاسی تامین شده سپس بخار مرطوب بوسیله سیستم مکش خارج می‌شود. روش دیگر، استفاده از خشک کردن استوانه‌ای است که در آن حرارت لازم برای انجام فرآیند تبخیر، به وسیله تماس با یک سطح با دمای بالا تامین می‌شود و سپس بخار مرطوب بوسیله مکنده‌هایی از سیستم خارج می‌گردد.

بطور کلی خشک کن‌ها را از حیث نحوه انتقال حرارت می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱- خشک کنهای مستقیم

۲- خشک کنهای غیر مستقیم

به طور کلی خشک کن‌هایی را که در آنها ذرات جامد مستقیماً در معرض گاز داغ قرار می‌گیرند، خشک کنهای مستقیم می‌گویند. همچنین خشک کن‌هایی را که در آنها گرما از خارج سیستم (به صورت تابشی یا رسانشی) انتقال می‌یابد، خشک کن‌های غیر مستقیم می‌نامند.

اختلاف اصلی خشک کنهای مستقیم و غیر مستقیم مربوط به روش قرار گرفتن ذرات جامد در معرض سطح گرم یا سایر منابع گرمایی است.

با توجه به موارد گفته شده می توان گفت که انواع روشهای خشک کردن عبارتند از:

۱- خشک کردن مستقیم (گرمایش از طریق عبور گاز داغ از ذرات) مانند خشک کردن بستر متحرک یا بستر سیال

۲- خشک کردن غیر مستقیم (گرمایش از طریق یک سطح گرم) مانند خشک کردن استوانه‌ای یا مکشی

۳- خشک کردن دی الکتریک (بکارگیری امواج رادیویی یا میکروویوها)

۴- خشک کردن انجمادی

در خشک کردن انجمادی ابتدا محلول منجمد شده و سپس با فرآیند تصعید (در دمایی پایین تر از نقطه ذوب محلول)، بطور مستقیم از فاز جامد به فاز گاز تبدیل می‌شود. خشک کردن انجمادی معمولاً تحت فرآیند مکش شدید انجام می‌گیرد. این نوع خشک کردن از فروپاشی ساختار جامد جلوگیری می‌کند. به طور کلی در مواردی مانند صنایع بیولوژیکی یا غذایی این روش یکی از بهترین روشهای خشک کردن می‌باشد که خصوصیات اولیه مواد را از بین نمی‌برد. از جمله کاربردهای این روش می‌توان به صنایع دارویی پزشکی و صنایع غذایی بویژه کنسرو سازی اشاره کرد. در این روش کیفیت پروتئینها و ویتامینها بدون تغییر باقی می‌ماند.

۵- خشک کردن فوق بحرانی (بکارگیری بخار فوق اشباع)

برخلاف تصور این امر امکان پذیر است، زیرا آب درون محصول تبخیر شده و به سیال عامل (بخار آب) می‌پیوندد و سپس از سیستم خارج می‌شود.

۱-۴ انواع خشک کن ها

خشک کن ها را از نظر عملیاتی می توان به دو دسته مداوم و غیر مداوم تقسیم کرد:

۱- خشک کن های مداوم^۱

در خشک کن های از نوع مداوم مواد تر ورودی و مواد خشک خروجی به طور مداوم وارد و خارج می شوند. مقدار رطوبت ماده و پارامترهای هوا در طول خشک کن و یا در ارتفاع خشک کن دایما در حال تغییر است و هوا و ماده همواره در تماس با یکدیگر قرار دارند. فرایند خشک کردن در سطح مقطعهای مختلف خشک کن دارای شرایط پایدار با زمان است.

۲- خشک کن های غیر مداوم^۲

در خشک کن های غیرمداوم مواد به صورت ساکن هستند مگر در مواقع تخلیه و یا مخلوط کردن مواد، که در حرکت می باشند. تغییر مقدار رطوبت ماده خشک کن بستگی به جریان هوا و زمان خشک کردن ماده دارد. خشک کن های غیرمداوم ساختمان ساده ای دارند و شرایط خشک کردن را می توان با تغییر دادن شرایط هوا در هر لحظه تنظیم کرد.

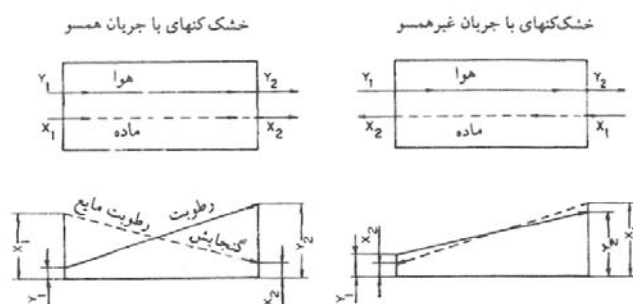
خشک کن های مداوم در مقایسه با خشک کنهای غیرمداوم استفاده بیشتری دارند زیرا در آنها مواد به صورت یکنواخت تر خشک شده و بهتر کنترل می شوند. همچنین سیستم آنها را ساده تر می توان به صورت خودکار درآورد و مصرف انرژی کمتری دارند.

خشک کنها براساس جهت جریان هوا نسبت به جریان ماده، به همسو و غیرهمسو و متقاطع و یا ترکیبی تقسیم می شوند که در شکلهای ۱-۱ و ۲-۱ نمایش داده شده اند. انتخاب مناسب براساس مقدار رطوبت ماده و مقدار رطوبتی که باید از آن گرفته شود صورت می گیرد. استفاده از جریان همسو در مواقعی که رطوبت ماده نباید از حدّ معینی کمتر شود و یا در مواقعی که حرارت روی خواص ماده اثر نامطلوب می گذارد پیشنهاد می شود.

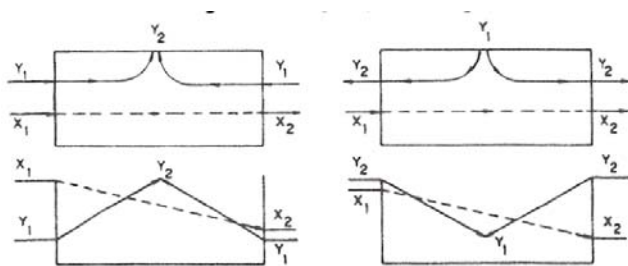
همانگونه که در بخش ۱-۳ گفته شد بر اساس روشهای مختلف خشک کردن، خشک کن ها را می توان به دو دسته کلی خشک کن های مستقیم و غیره مستقیم تقسیم کرد:

^۱ Continuous

^۲ Batch



شکل ۱-۱ الگوی جریان در خشک کن ها [۳]



شکل ۲-۱ خشک کن های با جریان متقاطع و ترکیبی [۳]

۱-۴-۱ خشک کن های مستقیم

به طور کلی خشک کن هایی را که در آنها ذرات جامد مستقیماً در معرض گاز داغ قرار می گیرند،

خشک کنهای مستقیم می گویند. برخی از انواع خشک کن های مستقیم عبارتند از:

- خشک کن کانالی^۱
- خشک کن نقاله‌ای^۲
- خشک کن چرخان^۳
- خشک کن بستر سیال^۴
- خشک کن افشانه‌ای^۵

^۱ Tunnel Dryer

^۲ Band Dryer

^۳ Rotary Dryer

^۴ Fluidized-bed Dryer

^۵ Spray Dryer

▪ خشک کن پنوماتیک^۱

۱-۴-۲ خشک کن های غیر مستقیم

خشک کن هایی را که در آنها گرما از خارج سیستم (به صورت تابشی یا رسانشی) انتقال می یابد، خشک کن های غیر مستقیم می نامند.

▪ خشک کن استوانه ای^۲

▪ خشک کن مکشی^۳

▪ خشک کن دی الکتریک^۴

▪ خشک کن آبی^۵

▪ خشک کن انجمادی^۶

▪ خشک کن مادون قرمز^۷

۱-۵-۵ خشک کن بستر سیال

۱-۵-۱ اصول عملیاتی و کاربردها

در میان روشهای جدید خشک کردن، خشک کن های با بستر سیالی از اهمیت و جایگاه خاصی برخوردارند. از این روش اصولاً برای مواد دانه ای استفاده می شود، با این حال، این نوع خشک کن برای موادی به صورت محلول و خمیری و سیالی نیز بکار برده می شود. روش خشک کردن براساس عبور هوای داغ از میان توده مواد است که در روی یک صفحه مشبک (توزیع کننده گاز) قرار گرفته اند، استوار می باشد. اگر سرعت گاز بیشتر از سرعت بحرانی سیالی شدن مواد

¹ Pnematic Dryer

³ Vaccum Dryer

⁵ Flash Dryer

⁷ Infrared Dryer

² Drum Dryer

⁴ Dielectric Dryer

⁶ Freeze Dryer

باشد آنگاه بستر مواد آنقدر وسیع می شود که به یک حالت شبیه جوشیدن مایع می رسد. این پدیده را سیالی شدن مواد گوییم.

خشک کن های بستر سیال هم به صورت غیرمداوم و هم به صورت مداوم می توانند کار کنند. نوع غیرمداوم آن در جایی به کار می رود که مقدار ماده خشک شونده کم باشد. اگر مقدار محصول بالا باشد بیشتر از خشک کن های مداوم استفاده می شود.

ابعاد اینگونه خشک کن ها به عوامل زیر بستگی دارد:

- مقدار مواد ورودی

- مقدار رطوبتی که باید از ماده گرفته شود

- سرعت گاز

- زمان ماند مواد در دستگاه

بسته به پارامترهای بالا، محدوده حجم خشک کن از $1-10 \text{ m}^3$ متغیر خواهد بود. ارتفاع بستر بین $1-15 \text{ m}$ و سرعت گاز معمولا در حدود $0.15-6 \text{ m/s}$ می باشد.

ویژگی های موادی که می توان با استفاده از خشک کن های بستر سیال خشک کرد عبارتند از:

- قطر ذرات ماده بین $1 \mu\text{m}$ تا 0.6 m متغیر می باشد. ذرات بین $10 \mu\text{m}$ تا $150 \mu\text{m}$ برای سیال

سازی بهترین نتیجه را می دهند. معمولا افزودن ذرات پالاینده کوچکتر به بستر همراه با ذرات

درشت تر موجب بهبود سیال سازی می شود [۳].

- مواد با درجه پراکندگی پایین، یعنی نسبت قطر بیشینه به قطر کمینه ذرات حدود $8-10$ باشد.

- ذرات باید متقارن باشند (سوزن، ورقه، پوسته قابل استفاده نیستند).

- موادی که به خشک کن وارد می شوند نباید به صورت کلوخه باشند که به سختی پراکنده می

شوند.

روش خشک کردن از طریق شناورسازی مواد این امکان را می دهد که چندین فرآیند در یک

دستگاه خشک کن انجام شود.

۱-۵-۲ مزایا و معایب بکارگیری خشک کن بستر سیال

مزایای اصلی خشک کن های با بستر سیالی عبارتند از:

- ۱- شرایط بسیار کارای انتقال حرارت و جرم
- ۲- اختلاط خوب و یکنواختی مواد در محفظه خشک کن که منجر به ایجاد شرایط همدمای در داخل محفظه می شود.
- ۳- سیال بودن بستر، عملکرد دستگاه (تعمیر و نگهداری) را حتی در موقعی که دبی محصول زیاد باشد ساده تر می کند.
- ۴- امکان به کارگیری منابع دیگر انرژی (قرار دادن صفحات داغ و امکان تولید تشعشع) مواردی از معایب بکارگیری بستر سیال عبارتند از:

- ۱- اختلاط سریع ذرات جامد در بستر مواد منجر به زمان ماند غیر یکنواخت ذرات جامد در محفظه می شود. که این امر سبب غیریکنواختی خشک کردن می گردد.
- ۲- در بسترهای حبابی با ذرات ریز، توزیع یکنواخت جریان گاز مشکل است که منجر به تماس غیر موثر گاز با مواد جامد می شود.
- ۳- سایش لوله ها، مجاری و صدمات وارد بر ذرات جامد امری مهم است که ممکن است سبب بروز مشکلاتی شود.

۱-۶ خشک کردن دانه ها

اغلب محصولات کشاورزی در شرایطی برداشت می شوند که محتوای رطوبت آنها بالاتر از میزان مطلوب برای ذخیره سازی است. بمنظور ایجاد شرایط مناسب برای ذخیره سازی محصولات کشاورزی و جلوگیری از رشد موجودات زنده ای نظیر مخمرها، کپک ها و باکتریها که باعث فساد آنها می شود، باید محصولات را در دما و محتوای رطوبت مناسب خشک کرد.

سالانه به طور متوسط ۲ میلیارد تن غلات، دانه های روغنی و بقولات تولید می شود که می بایست این محصولات تا زمان مصرف سالم و محفوظ نگهداری شوند. دوره ذخیره سازی دانه ها اساساً به دو عامل فیزیکی دما و مقدار رطوبت بستگی دارد. با کاهش دما، کاهش رطوبت و یا هر دو با هم دوره ذخیره دانه ها را می توان به میزان قابل ملاحظه ای افزایش داد. این در صورتی است که عوامل خارجی و زیستی مانند حشرات، کرمهای ریز، جوندگان و پرندگان دانه ها را مورد حمله قرار ندهند.

همانگونه که گفته شد دما و رطوبت دو عامل مهم در خشک کردن دانه ها و بهبود دوره ذخیره سازی آنها می باشند. به عنوان مثال هر چه دانه روغنی تر باشد محتوای رطوبت آن برای ذخیره سازی باید کمتر باشد. معمولاً در حبوبات رطوبت مطلوب ۱۴٪ می باشد. در حالی که در دانه های روغنی، رطوبت ۱۲/۵٪ برای سویا، ۸-۹٪ برای آفتاب گردان و ۹٪ برای بادام زمینی مناسب می باشد. همچنین ماکزیمم دمای ذخیره سازی مناسب برای دانه های نباتی تقریباً 18°C می باشد. هرچقدر مقدار رطوبت اولیه محصول بالاتر باشد به ناچار دمای هوای لازم برای خشک کردن نیز بالاتر خواهد بود. دانه هایی که برای غذای حیوانات مورد استفاده قرار می گیرند نسبت به دانه هایی که بعنوان بذر بکار برده می شوند می توانند در معرض دمای بالاتری قرار گیرند [۴].

۷-۱ شلتوک برنج

برنج یکی از مهم ترین غلات مهم در آسیا و از خانواده گرامینه ها (گندمیان) می باشد. دانه برنج و فرآورده های آن تقریباً ۴۰ درصد غذای نصف مردم دنیا را تشکیل می دهد. پس از گندم، برنج دومین غله مهم در دنیا به شمار می رود. نزدیک به ۹۰ درصد سطح زیر کشت و تولید برنج متعلق به کشورهای خاور دور می باشد. به طور کلی، کشورهای گرمسیری و نیمه گرمسیری مانند برمه، تایلند، ویتنام، لائوس، اندونزی، فیلیپین، پاکستان، هند، آمریکا، ژاپن، ایتالیا، مصر، چین، برزیل، کوبا، مکزیک و استرالیا از تولید کنندگان برنج به شمار می آیند [۱].

کشت برنج در ایران در نواحی شمالی به ویژه دستک و جنوبی به ویژه خوزستان تاریخچه طولانی دارد. شواهد نشان می‌دهد که این محصول در این ناحیه قرن‌ها پیش از میلاد مسیح و در زمان هخامنشیان رواج داشته است. بنابر آمار زراعی سال ۸۴-۱۳۸۳، در سطح ۶۲۸ هزار هکتار، ۲/۷۴ میلیون تن انواع واریته‌های مختلف شلتوک، در کشور تولید شده است که در این میان استان مازندران ۳۷/۱۷ درصد و استان گیلان ۲۷/۸۸ درصد از آن را تولید کرده‌اند. سه استان فارس، گلستان و خوزستان به ترتیب با ۹/۴۰، ۹/۱۸ و ۷/۱۸ درصد سهم در تولید شلتوک مقام‌های سوم تا پنجم را به خود اختصاص داده‌اند. شالیکاران پنج استان فوق ۹۰/۸۱ درصد شلتوک کشور را تولید کرده‌اند. از ۲۱ استان تولیدکننده شلتوک، بالاترین سهم به استان مازندران با ۱/۰۱ میلیون تن و کمترین سهم به استان یزد با ۴۴ تن شلتوک تعلق داشته است [۲].

میوه برنج، از دانه برنج و غلاف دانه که قهوه‌ای یا کهربایی رنگ است، تشکیل شده که دانه و غلاف را شلتوک می‌نامند. زمان برداشت برنج با توجه به دما معمولاً از ماه‌های خرداد و شهریور شروع شده و تا اواخر آبان و یا اوایل آذر ادامه می‌یابد. هنگام برداشت محصول باید ۸۰ درصد دانه‌های شلتوک واقع در بخش بالایی خوشه و برگ‌ها زرد شده و دانه‌ها سخت شده باشند. دانه‌ها معمولاً یک تا دو هفته از آغاز زرد شدن برگ‌ها سخت می‌شوند. البته درصد رطوبت شلتوک هم معیاری برای برداشت محسوب می‌شود. میزان رطوبت شلتوک باید بین ۲۰ تا ۳۵ درصد باشد. خوشه‌های بریده شده را دسته دسته کرده و پس از خشک کردن، برای مراحل دیگر آماده می‌کنند.

پس از برداشت خوشه‌های برنج و خشک کردن آنها، شلتوک را از ساقه و برگ‌ها جدا می‌کنند. در این مقطع شلتوک هنوز مقداری رطوبت دارد که جدا کردن غلاف را از دانه مشکل می‌کند. خشک کردن شلتوک فاصله‌ای بین دانه و غلاف بوجود می‌آید که جدا کردن دانه از غلاف را امکان‌پذیر می‌کند.

خشک کردن شلتوک در اقصی نقاط دنیا به شکل های مختلف انجام می شود. این روشها شامل سیلوها و تشت های حرارتی و سیستم های سنتی مثل استفاده از زمینهای مسطح و آفتاب می باشند. متأسفانه با در نظر گرفتن هزینه های سرمایه گذاری برای خرید دستگاههای صنعتی اکثر کشاورزان در ایران این فاز را با روشهای سنتی انجام می دهند که موجب تلفات دانه ها و آمیخته کردن بیشتر شلتوک به عوامل محیطی از جمله خاک و سنگ می شود.

پس از خشک کردن، شلتوک را بوسیله دستگاه های پوست کنی، پوست کنی می کنند. در این مقطع دانه های برنج از غلاف جدا شده و قهوه ای رنگ می باشند که به برنج قهوه ای نیز معروفند. سپس برنج قهوه ای صیقل داده می شود.

همانگونه که گفته شد رطوبت شلتوکها در حین برداشت و خرمnkویی بالا بوده (۲۰ تا ۳۰٪) و باید بلافاصله بعد از برداشت و خرمnkویی خشک شود تا میزان رطوبت به ۱۴ تا ۱۷٪ تقلیل یابد. آنچه در شرایط فعلی معمول است، خشک کردن در کنار آفتاب و یا خشک کن های سیلویی است که عدم یکنواختی در خشک کردن و خشک کردن تا رطوبت نامناسب موجب تلفات بیش از حد و مخصوصاً خرد شدن بیش از معمول برنج می شود [۲].

فصل دوم

مفاهیم پایه

در این بخش ابتدا توضیحاتی در مورد خواص بستر سیال و مراحل سیال سازی ارائه خواهد شد. سپس به بررسی سینتیک خشک کردن، روشهای مختلف خشک کردن، انواع خشک کن و بطور خاص خشک کن بستر سیال خواهیم پرداخت. در پایان به بررسی تحقیقات پیشین در این زمینه می پردازیم.

۱-۲ سیال سازی^۱

اساس پدیده سیال سازی بر این اصل استوار است که با عبور یک جریان سیال از بستری از مواد، ذرات به شکل شناور در آمده و به اصطلاح سیال سازی می شوند. مراحل مختلف سیال سازی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. هنگامی که یک سیال از میان ذرات یک بستر به سمت بالا هدایت شود، در دبی پایین، سیال فقط از فضای خالی بین ذرات ثابت عبور می کند. در این حالت یک بستر ثابت^۲ (شکل ۱-۱-۲) خواهیم داشت. با افزایش دبی جریان، ذرات از هم فاصله گرفته و اندکی مرتعش می شوند که در این شرایط بستر را بستر منبسط شده می نامند. با افزایش مجدد سرعت سیال به نقطه ای می رسیم که ذرات به سبب جریان رو به بالا، کاملاً شناور می شوند. در این نقطه، نیروی اصطکاکی بین ذرات و سیال با وزن ذرات در تعادل می باشد. این مرحله که آغاز سیال شدن بستر (شکل ۲-۱-۲) می باشد را مرحله حداقل سیال سازی می نامند. پس از این مرحله با افزایش اندک دبی، انبساط تدریجی و آرام بستر حاصل شده و ناپایداری های جریان کاهش می یابد. این بستر به نام های بستر سیال یکنواخت^۳ و یا بستر سیال آرام^۴ نامیده می شود. در سیستم جامد-گاز، این نوع بستر را تنها تحت شرایط خاص که ذرات سبک و ریز و گاز تحت فشار بالا استفاده می شود می توان مشاهده کرد. در سیستم جامد-گاز با افزایش دبی

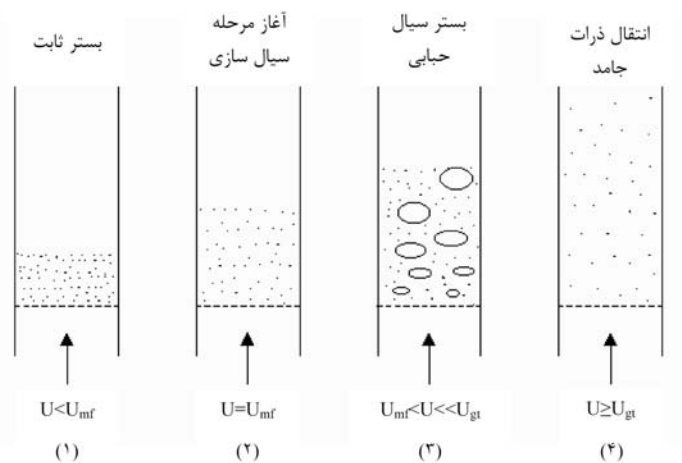
¹ Fluidization

² Fixed Bed

³ Homogeneously Fluidized Bed

⁴ Smoothly Fluizied Bed

جریان، پس از شرایط حداقل سیال سازی، ناپایداری های شدیدی به علت تشکیل حبابهای گاز مشاهده می شود. در دبی های بیشتر، اختلاط شدیدتر شده و حرکت ذرات جامد با شدت بیشتری انجام می شود. با این وجود حجم بستر از حجم شرایط حداقل سیال سازی بیشتر نخواهد شد. این چنین بستری را بستر سیال حبابی^۱ یا ناهمگن^۲ (شکل ۲-۱-۳) می نامند. در این حالت حبابهای گاز ضمن حرکت به سمت بالا با هم یکی شده و رشد می کنند. در بسترهای با ارتفاع کم، این حبابها در عمق مناسب به اندازه کافی بزرگ شده و سپس در مقطع عرضی بستر پخش می شوند. با افزایش سرعت گاز، ذرات جامد بوسیله گاز حمل می شوند (شکل ۲-۱-۴) و در این شرایط پراکندگی، رقیق شدگی و یا به عبارت دیگر حالت فاز رقیق بستر سیال را به همراه انتقال ذرات جامد خواهیم داشت.



شکل ۲-۱-۳ مراحل مختلف سیال سازی [۵]

۲-۲ خشک کردن

۱-۲-۲ مفاهیم اولیه

۱- رطوبت

^۱ Bubbling Fluidized Bed

^۲ Hetrogeneous Fluizized Bed

مقدار رطوبت ماده را می توان به دو صورت تعریف کرد:

بر پایه خشک:

$$X = \frac{m_a}{m_s} \quad \text{جرم رطوبت (kg) به جرم ماده خشک (kg):} \quad (1-2)$$

بر پایه تر:

$$X' = \frac{m_a}{m} = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad \text{جرم رطوبت (kg) به جرم ماده تر (kg):} \quad (2-2)$$

m_a میزان رطوبت (kg)، m_s جرم ماده خشک (kg)، X و X' نیز به ترتیب رطوبت بر پایه خشک و تر می باشند. معمولاً مقدار رطوبت به صورت درصد بیان می شود. رابطه بین مقدار رطوبت براساس ماده خشک و مقدار رطوبت براساس ماده تر بصورت زیر می باشد:

$$X = \frac{X'}{1 - X'} \quad \text{و} \quad X' = \frac{X}{1 + X} \quad (3-2)$$

۲- رطوبت اولیه

مقدار رطوبت ماده در ابتدای عمل خشک کردن را رطوبت اولیه می نامند.

۳- رطوبت تعادلی^۱

مقدار رطوبتی از جسم که در حال تعادل با بخار موجود در عامل خشک کننده است را رطوبت تعادلی می نامند. این مقدار رطوبت، حداقل مقدار رطوبتی است که جسم می تواند در عمل خشک کردن در شرایط معینی داشته باشد. گاهی رطوبت تعادلی را مقدار رطوبت نمدار کمینه هم گویند.

۴- مقدار رطوبت بحرانی^۲

این پارامتر، شاخصی است که بمنظور توصیف گذار از مرحله خشک کردن با شدت ثابت به مرحله خشک کردن با شدت نزولی تعریف می شود.

¹ Equilibrium Moisture Content

² Critical Moisture Content

۵- مقدار رطوبت بیشینه

مقدار رطوبت ماده موقعی که تمام خلل و فرج آن از رطوبت اشباع شده باشد را رطوبت بیشینه می نامند.

۲-۲-۲ سینتیک خشک کردن

سینتیک خشک کردن درباره تغییرات زمانی مقادیر متوسط رطوبت و درجه حرارت ماده بحث می کند. شدت خشک کردن که منعکس کننده تغییرات مقدار رطوبت ماده نسبت به زمان است شدیداً تحت تأثیر پارامترهایی مانند درجه حرارت، رطوبت، سرعت نسبی هوا و فشار کل می باشد. قطر ذرات، برخوردهای میان آنها و همچنین برخوردهای بین ذرات و دیواره خشک کن نیز از جمله عواملی هستند که دبی خشک کردن را تحت تأثیر قرار می دهند. بمنظور توصیف فرایند خشک کردن می توان از نمودارهای زیر استفاده کرد:

۱- مقدار رطوبت مواد-زمان خشک کردن (منحنی خشک شدن)

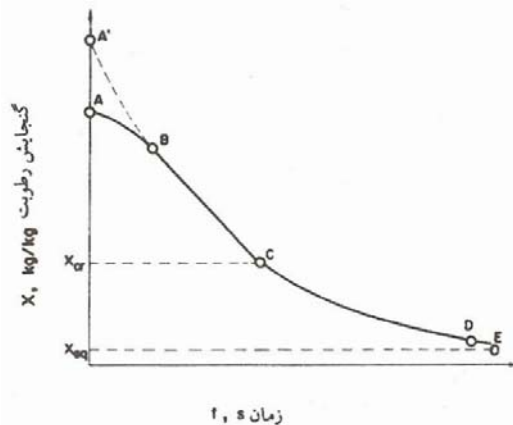
۲- نرخ خشک کردن-مقدار رطوبت مواد (منحنی نرخ خشک شدن)

۳- درجه حرارت مواد-مقدار رطوبت مواد (منحنی درجه حرارت)

اطلاعات لازم برای تعیین این منحنی ها معمولاً در شرایط آزمایشگاهی با اندازه گیری تغییرات زمانی جرم و درجه حرارت یک نمونه از ماده به دست می آید.

شکل ۲-۲ نمونه ای از منحنی خشک کردن را نشان می دهد. در ابتدای فرآیند خشک کردن و با گذشت زمان، رطوبت ماده کاهش می یابد. منحنی A-B تغییرات رطوبت ماده با زمان را نشان می دهد. پس از سپری شدن مدت زمان کوتاهی میزان رطوبتی که از جسم خارج می شود بطور یکنواخت کاهش می یابد و منحنی خشک کردن به صورت خطی در می آید. اولین مرحله خشک کردن (منحنی B-C)، مرحله خشک کردن با نرخ ثابت نامیده می شود. در این مرحله شیب نمودار خشک کردن که نشان دهنده شدت خشک کردن است ثابت می ماند. خطی بودن کاهش مقدار

رطوبت ماده تا نقطه بحرانی C، رطوبت بحرانی (X_{cr})، ادامه داشته سپس خط مستقیم به منحنی تبدیل شده و به صورت مجانبی تا نقطه رطوبت تعادلی ماده، X_{eq} ، پیش می رود. به این مرحله (منحنی C-D)، مرحله خشک کردن با نرخ نزولی گفته می شود.



شکل ۲-۲ منحنی خشک کردن [۳]

۱-۲-۲-۲ خشک کردن با نرخ ثابت

اگر مقدار رطوبت اولیه ماده، X_0 ، بیشتر از مقدار رطوبت بحرانی X_{cr} باشد و شرایط حاکم بر فرآیند خشک کردن ثابت بماند، خشک کردن با نرخ ثابت بوقوع می پیوندد. این یک قاعده تجربی است که بوسیله آزمون های تجربی محقق گردیده است.

اگر شرایط حاکم بر خشک کردن ثابت نگهداشته شود، درجه حرارت سطح جسم t_s ، با درجه حرارت تر هوا t_{wb} برابر خواهد بود و این وضع در تمام طول فرایند خشک کردن در این مرحله ادامه خواهد یافت:

$$T_s = T_{wb} = const. \quad (۴-۲)$$

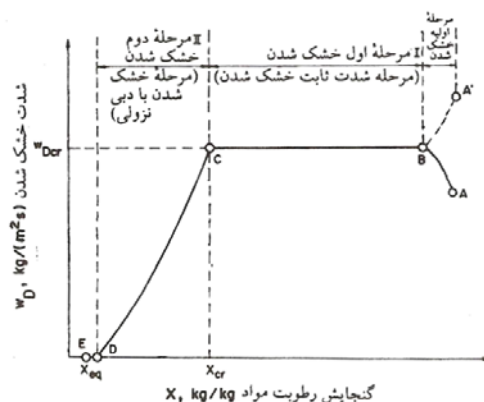
۲-۲-۲-۲ خشک کردن با نرخ نزولی

اگر مقدار رطوبت اولیه ماده، X_0 ، کمتر از مقدار رطوبت بحرانی X_{cr} باشد، خشک کردن با نرخ نزولی به وقوع می پیوندد و از این پس آهنگ خشک کردن جسم در اثر گذشت زمان سیر نزولی خواهد پیمود.

دبی خشک کردن (W_D) را می توان بصورت مقدار رطوبت خارج شده از واحد سطح ماده در واحد زمان تعریف کرد. بدین ترتیب:

$$W_D = -\frac{m \cdot dX}{A \cdot dt} \quad (5-2)$$

W_D دبی خشک کردن، m جرم ماده و A نشان دهنده سطح ماده می باشد. نمودار شدت خشک کردن در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود مراحل خشک کردن نیز در شکل مشخص شده است.



شکل ۳-۲ منحنی شدت خشک شدن [۳]

در مرحله اول خشک کردن (منحنی A-B) سطح ماده از یک لایه مایع پوشیده شده و دارای درجه حرارتی کمتر از درجه حرارت تعادل، T_s ، می باشد. در نتیجه دبی خشک کردن در محدوده بین نقاط A و B افزایش می یابد تا اینکه درجه حرارت سطح به درجه حرارت مربوط به خط B-C برسد. در حالی که خشک کن با ماده تری با درجه حرارت $T > T_s$ تغذیه شود، مرحله اول خشک کردن متناظر با خط A'-B خواهد بود. معمولاً مرحله اول خشک کردن خیلی کوتاه بوده و در عمل قابل اغماض می باشد.

وقتی $X < X_{cr}$ ، مقدار رطوبتی که از داخل ماده به سطح آن می رسد بتدریج شروع به کاهش یافتن می کند. در نتیجه از فشار بخار بالای سطح ماده نیز کاسته شده و دبی خشک کردن کاهش می یابد. این حالت متناظر با مرحله خشک کردن با نرخ نزولی می باشد (منحنی C-D).

۲-۲-۳ زمان خشک کردن

معادله (۵-۲) برای شدت خشک کردن را می توان به صورت زیر بازنویسی و انتگرال گیری کرد:

$$\int_0^t dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{W_D} \quad (۶-۲)$$

که در آن X_1 و X_2 به ترتیب مقادیر رطوبت در زمان های $t=0$ و t می باشند.

برای مرحله خشک کردن دبی ثابت داریم:

$$W_D = \text{const.} \quad (۷-۲)$$

بنابراین با استفاده از رابطه (۶-۲) زمان مرحله اول خشک کردن بصورت زیر بدست می آید:

$$t_I = \frac{m_s}{A \cdot W_{DI}} (X_1 - X_{cr}) \quad (۸-۲)$$

که در آن $X_2 = X_{cr}$ ، رطوبت ماده در انتهای مرحله خشک کردن با دبی ثابت (رطوبت بحرانی) می باشد.

پیچیدگی و غیریکنواختی ساختمان متخلخل ماده مشکلاتی را در محاسبه رطوبت بحرانی ایجاد می کند. از اینرو مطمئن ترین روش تعیین مقدار رطوبت بحرانی، اجرای آزمایش در شرایط عملی می باشد.

در مرحله دوم خشک کردن، شدت خشک کردن متغیر بوده و لذا نمی توان آن را از انتگرال خارج کرد. زمان خشک کردن در مرحله خشک کردن با دبی نزولی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$t_{II} = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_{cr}} \frac{dX}{W_{DII}} \quad (۹-۲)$$

که در این حالت X_2 نشان دهنده رطوبت نهایی ماده می باشد. اگر نمودار تابع $W_{DII} = f(x)$ شناخته شده باشد مقدار انتگرال را از طریق ترسیمی می توان محاسبه کرد. با رسم نمودار کمکی

و $\frac{1}{W_{DII}} = f(x)$ محاسبه سطح زیر منحنی در محدوده بین رطوبت بحرانی X_{cr} و X_2 و

جایگزینی مقادیر به دست آمده در رابطه (۲-۹)، می توان زمان خشک کردن در مرحله خشک کردن با دبی نزولی را بدست آورد.

۲-۳ اصول طراحی خشک کن ها

هدف از طراحی خشک کن تعیین پارامترهای زیر است:

- ابعاد دستگاه

- ویژگی های ورودی و خروجی عامل خشک کننده و ماده مرطوب

- نیروی محرکه مورد نیاز برای انجام فرآیند خشک کردن

مهمترین پارامترهایی که در طراحی خشک کن ها باید در نظر گرفته شود عبارتند از:

۱- ویژگی های ماده در ورودی، شامل: رطوبت ماده X_1 ، دبی ماده W_s ، دمای ماده T_{s1}

۲- ویژگی های عامل خشک کننده در ورودی، شامل: رطوبت Y_1 ، سرعت گاز U_g ، دمای گاز T_{g1} ،

دبی W_g

۳- ویژگی های ماده در خروجی، شامل: رطوبت ماده X_2 ، دمای ماده T_{s2}

۴- ویژگی های عامل خشک کننده در خروجی، شامل: رطوبت Y_2 ، دمای گاز T_{g2}

بمنظور طراحی خشک کن معمولاً اطلاعات زیر معلومند:

- نوع خشک کن

- مقدار ورودی، W_s

- مقدار رطوبت ماده در ورودی و خروجی X_1 و X_2

- درجه حرارت ماده در ورودی و خروجی، T_{s1} و T_{s2}

- رطوبت عامل خشک کننده در ورود به خشک کن، Y_1

هدف طراحی، تعیین پارامترهای مجهول است که عبارتند از:

۱- سرعت ورودی گاز، U_g

۲- دمای گاز، T_{g1}

۳- دبی گاز، W_g

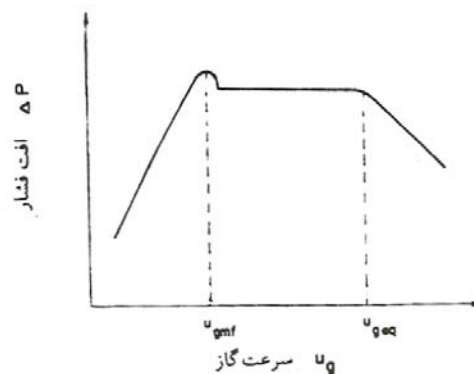
۴- ویژگی های ساختمان خشک کن

اطلاعات بالا اساس طراحی دیگر اجزای خشک کن را تشکیل می دهند.

۲-۴ عوامل موثر در طراحی خشک کن بستر سیال

۲-۴-۱ کمینه سرعت سیال سازی^۱

افزایش سرعت گاز گذرنده از یک بستر ثابت مواد، ابتدا باعث شل شدن بستر می شود. این پدیده با افزایش تخلخل در داخل بستر همراه است. جریان هوا از فضای خالی بین ذرات ماده در بستر جریان پیدا کرده و به این ترتیب افت فشار زیادی ایجاد می شود. وقتی که گاز به سرعتی می رسد که حبابهای گاز در بستر ظاهر می شوند، افزایش افت فشار متوقف می شود. این پدیده در شکل ۲-۴ نشان داده شده است که در آن افت فشار بر حسب سرعت گاز رسم شده است. به این منحنی، منحنی سیال سازی و به سرعت مربوط به افت فشار حداکثر، کمینه سرعت سیالی می گویند (U_{mf}).



شکل ۲-۴ منحنی سیالی شدن [۳]

¹ Minimum Fluidization Velocity

۲-۴-۲ سرعت حامل

سرعت گاز هنگامی که ذرات ماده را در محفظه به دنبال خود می کشاند سرعت حامل (U_{gt}) نامیده می شود. به عبارت دیگر سرعتی است که گاز بتواند ذرات ماده را از محفظه خارج کند.

۲-۴-۳ افت فشار در بستر

توجه داشته باشید که جریان گاز در میان یک بستر شناور می تواند مانند جریان گاز در داخل یک محیط متخلخل عمل نماید، لذا برای محاسبه افت فشار می توان از روابط کوزنی-کارمن^۱، ارگن، لوی^۲ و دیگران استفاده کرد. چون در بسترهای سیالی عدد Re از ۲۰ تجاوز خواهد کرد لذا استفاده از رابطه کوزنی-کارمن که در این محدوده برقرار می باشد پیشنهاد می گردد [۶]:

$$\Delta p = 180 \frac{u_g L \mu (1 - \varepsilon)^2}{(dp \psi)^2 \varepsilon^3} \quad (10-2)$$

Δp افت فشار ناشی از ستون مواد (pa)، L ارتفاع بستر مواد (m)، ε تخلخل، μ چسبندگی دینامیکی ($kg/m.s$)، U_g سرعت سیال (m/s)، dp قطر ذرات (m) و ψ کرویت دانه های بستر می باشد.

اگر در این رابطه از مقدار واقعی تخلخل در شروع سیالی شدن، ε_{mf} ، استفاده شود افت فشار بستر محاسبه می شود.

۲-۴-۴ ارتفاع بستر

پارامتر مهم دیگر ارتفاع بستر است. از نظر اقتصادی توصیه می شود که دستگاه تا حد ممکن متمرکز ساخته شود، مثلاً نسبت قطر یا عرض دستگاه به ارتفاع آن (که بستگی به نوع خشک کن دارد) در محدوده ۱-۰/۲۵ باشد.

¹ Kozeny-Carman

² Leva

روشهای تقریبی متعددی برای محاسبه ارتفاع بستر پیشنهاد شده است. مثلاً، ارتفاع بستر برابر $80 D_0$ (قطر سوراخهای شبکه) پیشنهاد شده است [۷]. معمولاً ارتفاع بستر را براساس اندازه گیری سینتیک خشک کردن در یک دستگاه خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی معین می کنند.

۲-۴-۵ توزیع کننده گاز

محاسبات مربوط به صفحه توزیع کننده، بخش مهمی از طراحی خشک کن بستر سیال می باشد. کاربرد عمده توزیع کننده که اغلب به شکل یک صفحه سوراخدار مشبک است، یکنواخت کردن جریان سیال می باشد. نظریات متعددی در مورد نسبت افت فشار در توزیع کننده گاز (ΔP_d) به افت فشار در بستر (ΔP_b) وجود دارد. کریزی^۱ و کورشی^۲ معادله زیر را برای مقدار بهینه این نسبت براساس گزارشات آزمایشگاهی پیشنهاد کرده اند [۸]:

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_b} = 0.01 + 0.2 \left[1 - \exp\left(-0.5 \frac{D_0}{L}\right) \right] \quad (11-2)$$

ΔP_d افت فشار ناشی از توزیع کننده گاز، ΔP_b افت فشار ناشی از بستر، D_0 قطر سوراخها و L ارتفاع بستر می باشد.

همانگونه که ذکر شد توزیع کننده گاز را بیشتر به صورت ورقه فلزی سوراخداری طراحی می کنند به گونه‌ایکه افت فشار ΔP_d را ایجاد کند. طراحی آن به منظور انتخاب درست قطر سوراخها، ضخامت شبکه، درجه آزادی شبکه (نسبت سطح سوراخها به سطح کل شبکه)، β ، صورت می گیرد. افت فشار ناشی از صفحه توزیع کننده را می توان از رابطه زیر تعیین کرد [۳]:

$$\Delta p_d = 1.04 \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.25} \cdot \frac{U_{go}^2 \rho_{go}}{2} \quad (12-2)$$

که d_0 قطر سوراخهای شبکه، b ضخامت صفحه توزیع کننده، U_{go} سرعت گاز در داخل سوراخها، ρ_{go} چگالی گاز در داخل سوراخها است.

¹ Creasy

² Quereshi

درجه آزادی شبکه به صورت نسبت سرعت گاز بر سرعت گاز در سوراخها تعریف می شود:

$$\beta = \frac{u_g}{u_{go}} \quad (13-2)$$

β را از رابطه زیر می توان محاسبه کرد:

$$\beta = \left(\frac{K_s \cdot d_o}{s} \right)^{0.833} \quad (14-2)$$

که s فاصله بین محوره‌های سوراخها و K_s یک ثابت هندسی است که برای سوراخهای با فاصله مستطیلی برابر $0/885$ و برای سوراخهای با فاصله مثلثی $0/952$ می باشد.

اغلب شبکه های بکار رفته برای سیال سازی درجه آزادی برابر با 1% تا 5% و قطر سوراخهایی برابر با $0/001-0/005$ m دارند.

۲-۴-۶ رطوبت اولیه

تحقیقات فراوانی در رابطه با تاثیر رطوبت مواد بر ویژگی های سیال سازی بسترهای سیالی انجام شده است. نتایج حاصل نشان می دهند که اگر رطوبت ماده از میزان معینی تجاوز کند، مشکلاتی در سیال سازی آن بوجود خواهد آمد. بدین ترتیب که این پدیده موجب افزایش کمینه سرعت سیال سازی می گردد. همچنین تخلخل بستر نیز با افزایش مقدار رطوبت ماده افزایش می یابد و ممکن است موجب غیریکنواختی ساختار بستر شود [۳].

۲-۵ خواص دانه ها

آگاهی از شکل، اندازه، حجم، جرم مخصوص، اندازه سطح و دیگر ویژگی های فیزیکی و حرارتی دانه ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این ویژگی ها برای تعیین ضریب انتقال حرارت و جرم و خواص جریان (برای مثال، عدد رینولدز) ضروری می باشد.

۲-۵-۱ ویژگی های فیزیکی

۲-۵-۱-۱ حجم

غلات و دانه های روغنی از نظر شکل نامنظم هستند و تعیین حالت و شکل آنها نیاز به اندازه گیری های زیادی دارد. گرفت و اسمیت (۱۹۶۴) از رابطه زیر برای تعیین شکل یک جسم استفاده کردند [۴]:

$$V = A a_1^{b_1} a_2^{b_2} a_3^{b_3} \quad (۲-۱۵)$$

در این رابطه V برابر با حجم یک نمونه، A ضریب تبدیل مناسب، a_1 ، a_2 و a_3 قطرهای درونی جسم که بعنوان معیاری از اندازه در نظر گرفته می شوند و b_1 ، b_2 و b_3 ضرایب می باشند. براساس شیوه گرفت و اسمیت، چندین محقق بنامهای Nelson (۱۹۸۰)، فوستر و آوکس (۱۹۸۰) و Bhardvaj و Shepherd (۱۹۸۶) اندازه دانه های غلات را با اندازه گیری سه بعد اصلی جسم تعیین نمودند [۴]. محسنین^۱ (۱۹۸۶) نشان داد که برای اجسام نامنظم مانند دانه ذرت، اندازه گیری سه بعدی محوری اطلاعات کافی را درباره شکل و اندازه دانه در اختیار ما قرار می دهد. محدوده ابعاد برخی از دانه ها در پیوست ۱ آورده شده است.

۲-۵-۱-۲ کرویت^۲

کرویت جسم را می توان بصورت نسبت سطح رویه کره ای هم حجم جسم به سطح رویه جسم تعریف کرد. از آنجا که اندازه گیری سطح رویه یک جسم نامنظم مشکل می باشد، کرویت یک جسم را می توان بصورت نسبت قطر معادل جسم d_e به قطر کوچکترین کره محیطی d_c برآورد نمود که معمولاً بلندترین قطر جسم مورد نظر می باشد (کواری، ۱۹۵۱).

$$Sphericity = \frac{d_e}{d_c} \quad (۲-۱۶)$$

^۱ Mohsenin

^۲ Sphericity

قطر معادل جسم، d_e ، بصورت زیر محاسبه می شود:

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6V_{ke}}{\pi}} \quad (17-2)$$

که V_{ke} حجم دانه معادل می باشد. پاییس^۱ ۱۹۸۲، حجم دانه معادل را با استفاده از جرم دانه m_k ، تعداد دانه ها n و جرم مخصوص دانه ρ_k ، بصورت زیر تعیین نمود [۴]:

$$V_{ke} = \frac{m_k}{\rho_k \cdot n} \quad (18-2)$$

معمولاً جرم دانه m_k را برای هر هزار دانه می توان از روی جدولهای مناسب تعیین نمود. جرم ۱۰۰۰ دانه برخی از دانه های غلات در جدول ۱-۲ آورده شده است.

در حالتی که ذرات ماده همگن باشند (مانند دانه های نباتی)، می توان قطر هندسی معادل را به شکل زیر نیز تعریف کرد:

$$d_e = (a.b.c)^{\frac{1}{3}} \quad (19-2)$$

a، b و c بترتیب قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک دانه (m) می باشند.

جدول ۱-۲ جرم ۱۰۰۰ دانه برای برخی از دانه های غلات [۴]

Seeds	Mass of 1000	Moisture Content	Reference
	Kernels		
	M_{1000}	M	
	(g)	(kg H ₂ O/kg dm)	
Barley	≈ 33	0.10	Martin et al. (1976)
Beans	200.6 ± 10.1	0	Biłowicka (1974)
Corn	240-280	0-0.15	Mühlbauer (1974)
Fava beans	440.0 ± 23.0	0	Biłowicka (1974)
Flax	≈ 4.1	0.10	Bekasov and Denisov (1952)
Lupine	119.8 ± 5.4	0	Biłowicka (1974)
Oats	≈ 33	0.08	Martin et al. (1976)
Peanuts	333-1000	0.06	Martin et al. (1976)
Peas	171.8 ± 13.6	0	Biłowicka (1974)
Poppy seed	≈ 5.5	0.10	Bekasov and Denisov (1952)
Rice	≈ 15	0.10	Martin et al. (1976)
Rye	≈ 25	0.10	Martin et al. (1976)
Sesame seeds	≈ 5	0.06	Martin et al. (1976)
Soybeans	77-167	0.08	Martin et al. (1976)
Sunflower	≈ 77	0.07	Martin et al. (1976)
Wheat	≈ 29	0.11	Martin et al. (1976)

بدین ترتیب ضریب کرویت بر اساس ابعاد ذره بصورت زیر محاسبه می شود:

¹ Pabis

$$\psi = \frac{(a.b.c)^{\frac{1}{3}}}{a} \quad (20-2)$$

۲-۵-۱-۳ جرم مخصوص

تغییرات حاصله در جرم مخصوص دانه که ناشی از تغییرات محتوای رطوبت دانه می باشد چندان حائز اهمیت نیست. جرم مخصوص در نمونه های مرطوب برابر است با جرم مخصوص دانه های خشک با احتساب خطای نسبی $\pm 3\%$ در محدوده رطوبتی آزمایش [۴]. جرم مخصوص ذرات را می توان با وزن کردن حجم معینی از ذرات نیز تعیین کرد.

۲-۵-۱-۴ تخلخل^۱

تخلخل عبارت است از نسبت حجم دانه ها به کل حجمی که بوسیله آنها اشغال شده است (حجم دانه به اضافه حجم فضای بین دانه ها). تخلخل معمولاً براساس درصد بیان می شود. بنابراین:

$$\varepsilon = \frac{V - V_k}{V} \quad (21-2)$$

که در آن:

V = مجموع حجم دانه ها بصورت توده ای (حجم اشغال شده بصورت طبیعی)، m^3

V_k = حجم دانه ها، m^3

ε = میزان تخلخل، درصد

در دستگاهی با سطح مقطع ثابت، تخلخل بستر براساس میزان افزایش ارتفاع بستر (نسبت ارتفاع بستر در حالت دینامیکی به ارتفاع بستر در حالت سکون) قابل محاسبه است. به این ترتیب [۴]:

$$\varepsilon_{dy} = 1 - \frac{L_{st}}{L} (1 - \varepsilon_{st}) \quad (22-2)$$

¹ Porosity

که در آن L_{st} ارتفاع بستر در حالت سکون و ε_{st} تخلخل بستر در حالت سکون است. تخلخل تعریف شده با رابطه (۲-۲۳) مقدار متوسط بدون در نظر گرفتن تغییرات موضعی است. مقدار تخلخل را همچنین از رابطه تودز می توان محاسبه کرد [۹]:

$$\varepsilon = \left(\frac{18Re + 0.36Re^2}{Ar} \right)^{0.21} \quad (2-23)$$

برای محاسبه تخلخل بستر در ابتدای سیال سازی، ε_{mf} می توان از رابطه ارائه شده توسط Sugiyama و Arai (۱۹۷۴) استفاده کرد [۱۰]:

$$\frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\psi^2 \varepsilon_{mf}^3} = 11 \quad (2-24)$$

۲-۵-۲ ویژگی های حرارتی

ویژگی های توده دانه ها که بایستی به منظور تجزیه و تحلیل فرایندهای حرارتی تعیین گردند عبارتند از: گرمای ویژه C ، رسانایی گرمایی k و انتشار گرمایی α . بعلاوه از آنجاییکه فرایندهای گرمایی معمولاً مستلزم انتقال گرما بصورت جابجایی (همرفت) بین هوا و دانه ها در یک بستر فشرده می باشد، آگاهی از ضریب انتقال حرارت بین سیال و دانه ها، h نیز ضروری است.

۲-۵-۲-۱ گرمای ویژه

گرمای ویژه برابر است با مقدار گرمایی که لازم است تا دمای یک کیلوگرم توده دانه را یک درجه سانتیگراد تغییر دهد. اگر افزودن گرمای dQ به ماده خشک با جرم m_s باعث افزایش دمایی برابر با dt در آن شود، گرمای ویژه محصول (بر پایه خشک) را می توان اینگونه تخمین زد:

$$C_{db} = \frac{1}{m_s} \frac{dQ}{dt} \quad (2-25)$$

اگر جرم ماده مرطوب، m_w ، مورد استفاده قرار بگیرد در این حالت:

$$C_{wb} = \frac{1}{m_w} \frac{dQ}{dt} \quad (2-26)$$

اندیس های db و wb بترتیب بیانگر بر پایه ماده خشک و ماده مرطوب می باشند.

گرمای ویژه اندازه گیری شده از جرم خشک دانه ها برای بعضی از محصولات در جدول ۲-۲ داده شده است.

۲-۲-۵-۲ هدایت گرمایی

هدایت گرمایی در اغلب مواد زنده و فعال شامل غلات با تغییرات دما تغییر می کند. به عنوان مثال هدایت گرمایی گندم بهاره قرمز تابعی خطی از مقدار رطوبت در محدوده دمایی آزمایش شده بین ۶- تا ۲۰ درجه سانتیگراد می باشد (چاندرا و موئیر، ۱۹۷۱). تاثیر دما بر هدایت گرمایی در رطوبتهای مختلف تغییر می کند.

بنابراین چاندرا و موئیر میانگین هدایت گرمایی را در محدوده رطوبتی بین ۴/۴-۲۲/۵٪ بر پایه تر انتخاب نمودند تا بتوانند این تأثیر را نشان دهند. معادلات مختلفی برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی غلات و دانه های مختلف ارائه گردیده که در پیوست ۲ آورده شده است [۴].

جدول ۲-۲ گرمای ویژه خشک برخی از بذرها [۴]

Seeds	Specific Heat c_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Reference
Alfalfa seed	1172	Bern (1964)
Barley, Carma	1245	Mühlbauer and Scherer (1977)
Beans	1293	Mühlbauer and Scherer (1977)
Corn	1247 - 1369	Koschitzky (1973)
Corn	2035	Pabis and Henderson (1962)
Corn	1534	Kazarian and Hall (1965)
Oats	993 - 1278	Brooker et al. (1974)
Oats	1277	Haswell (1954)
Oats, Tiger	1282	Mühlbauer and Scherer (1977)
Rapeseed	1553 - 1569	Mühlbauer and Scherer (1977)
Rice	1637	Alam and Shove (1972)
Rice, shelled	1197	Haswell (1954)
Rice, unshelled	1109	Haswell (1954)
Rye, Tero	1272	Mühlbauer and Scherer (1977)
Sorghum	1397	Sharma and Thompson (1973)
Wheat	1454	Kazarian and Hall (1965)
Wheat, Caribo	1276	Mühlbauer and Scherer (1977)
Wheat	1287 - 1299	Brooker et al. (1974)
Wheat	1185 - 1260	Mohsenn (1980)
Wheat, HRS	1097	Muir and Viravanichai (1972)

HRS = hard red spring.

۲-۲-۵-۳ انتشار گرما

انتشار گرما را می توان با استفاده از معادله زیر تعریف کرد:

$$\alpha = \frac{k}{C \cdot \rho_k} \quad (27-2)$$

k هدایت گرمایی، C گرمای ویژه و ρ_k جرم مخصوص دانه است که با توجه به مقادیر آزمایشی اندازه گیری شده محاسبه می شوند. این روش را روش غیرمستقیم می نامند (سویت، ۱۹۸۶). همچنین انتشار گرمایی را می توان مستقیماً با بکارگیری هدایت گرمایی در حالت انتقالی اندازه گیری نمود. معادله دیفرانسیل فوریه که بیان کننده هدایت گرما در اجسام همگون می باشد با این روش حل می شود. فرمول های حاصل برای محاسبه انتشار گرما برای تعدادی از محصولات براساس روشهای اندازه گیری مستقیم و غیرمستقیم در جدول ۲-۳ نشان داده شده است.

۲-۵-۲-۴ ضریب انتقال حرارت جابجایی

ضریب انتقال حرارت جابجایی یکی از اساسی ترین ویژگی های انتقال حرارت برای بررسی فرایندهای گرم کردن، سرد کردن و یا خشک کردن می باشد. انتقال حرارت بین هوا بعنوان یک سیال و دانه های محصولات کشاورزی می تواند از طریق هدایت، جابجایی طبیعی و یا جابجایی اجباری صورت پذیرد.

جدول ۲-۳ معادلات مربوط به محاسبه انتشار حرارت در برخی از دانه های غلات به شکل توده ای [۴]

Crop (Method)	Formula, Range of Application* α (m ² /h)	Reference
Chickpeas (indirect)	$\alpha = 4.788 \times 10^{-3} - 3.04 \times 10^{-5}T$ $+ 5.04 \times 10^{-8}T^2$ $+ 1.3644 \times 10^{-2}M$ $- 1.3788 \times 10^{-3}M^2$ $- 4.068 \times 10^{-5}MT$ $0.125 \leq M \leq 0.265$ $293 \leq T \leq 307K$	Dutta et al. (1988)
Rice bran	$\alpha = 3.17 \times 10^{-8} + 1.78 \times 10^{-9}M'$ $+ 2.37 \times 10^{-10}t + 9.27 \times 10^{-11}p_b$ $7 \leq M' \leq 15\%$ $42 \leq t \leq 68^\circ C$ $410 \leq p_b \leq 490 \text{ kg/m}^3$	Sreenarayanan and Chattopadhyay (1986)
Rough rice (indirect)	$\alpha = 0.0004859 + 0.0000089M$ $12 \leq M' \leq 18\%$	Wratten et al. (1969)
Wheat (direct)	$\alpha = 0.000250 + 0.000005M'$ $10 \leq M' \leq 20\%$	Gerzoi and Samochetov (1951)

*M = moisture content, kg H₂O/kg dm; M' = moisture content, % wb.

مکانیسم اصلی انتقال گرما از هوا به درون ذرات در طول فرایندهای گرم کردن، سرد کردن و یا خشک کردن محصولات کشاورزی از نوع همرفت اجباری می باشد. در همرفت اجباری ضریب انتقال گرما h از روی عدد ناسلت Nu محاسبه می شود.

$$Nu = \frac{hd_e}{K_g} \quad (28-2)$$

h = ضریب انتقال حرارت جابجایی، $W/m^2.k$

d_e = قطر معادل ذره، m

K_g = ضریب هدایت گرمایی هوا، $W/m.k$

عدد ناسلت از رابطه تجربی و براساس اعداد پراتل و رینولدز تعیین می شود:

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (29-2)$$

مقایسه برخی از روابط تجربی و نظری که برای تعیین عدد ناسلت ارائه شده اند در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲ معادلات مربوط به محاسبه عدد ناسلت [۴]

Source	Description	Re Range	Formula for Nu
1 Gorbis (1964)	Rate of evaporation of water droplet	0-50	$2 + 0.276Re^{0.5}$
2	Heat exchange with a suspended sphere	150-30,000	$0.62Re^{0.5}$
3	Theoretical equation (sphere)	0-2,000	$2 + 0.16Re^{0.75}$
4	Rate of evaporation of water droplet	0.7-200	$2 + 0.15Re^{0.47}$
5	Heat exchange with a fixed sphere*	$3.5-30 \times 10^4$	$0.216Re^{0.54}$
6	Theoretical equation (sphere)	0-100	$2 + 0.33Re^{0.5}$
7	Theoretical equation (sphere)	10^3-10^5	$0.5Re^{0.5} + 0.09Re^{0.33}$
8 McAdams (1954)	Data of many researchers	17-70,000	$0.37Re^{0.5}$
9 Gorbis (1964)	Heat exchange with a fixed smooth sphere	200- 10^3	$8.2Re^{0.56}$
		$10^3-1.2 \times 10^4$	$1.06Re^{0.457}$
		$1.2 \times 10^4-1.1 \times 10^5$	$0.27Re^{0.5}$
10	Heat exchange in counter flow for sphere at natural and forced convection	0-100	$2 + 0.0186Re^{1.235}$
11	Heat exchange with a sphere	—	$0.37Re^{0.53}$
12	Heat exchange with rough sphere ^b	10^3-10^5	$0.075Re^{0.73}$
13	Generalization of many data	200-15,000	$0.333Re^{0.6}$
14 Schetnikov (1961)	Heat exchange with a fixed sphere*	$10-1.61 \times 10^5$	$0.143Re^{0.67}$
15 Gorbis (1964)	Generalization of many data	5- 10^5	$2 + 0.028Re^{0.54} + 0.31Re^{0.54}$
16 Hobler (1971)	Layer of spheres of diameter < 19 mm	$Re < 350$	$1.95Re^{0.49}Pr^{0.33}$
17 Gorbis (1964)	Gas flow through porous granular layer	20-200	$0.106Re$
		$Re > 200$	$0.510Re^{0.57}$
18	Grain layer in counter flow	$Re < 200$	$0.014RePr^{0.33}$
		200-700	$0.056Re^{0.87}Pr^{0.33}$
19 Pabis (1967)	Generalization of many data for cylindrical and spherical materials	10-40	$1.40Re^{0.714}$
		40- 10^3	$0.338Re^{0.6}$

*Degree of turbulence 0.4%.

^bRoughness factor 0.01E.

^cDegree of turbulence 2.4%.

۲-۵-۳ مقاومت در برابر شکستگی

مراحلی از قبیل خشک کردن در دمای بالا ممکن است باعث تولید شکافها یا ترکهایی بر روی دانه ها شوند. یک دیدگاه برای مطالعه شکافها بر روی پوشش دانه ها دیدگاه تجربی می باشد بدین صورت که ضمن تغییر شرایط خشک کردن بصورت آزمایشی، شکافهای تولید شده مورد مشاهده و دقت قرار می گیرند (تنگ و سخن سنج، ۱۹۹۰).

پارامترهای مربوط به خشک کردن که بر تولید شکافها تأثیر می گذارند عبارتند از گرادیان دما، گرادیان رطوبت، دمای هوای خشک کننده و مدت زمان خشک کردن (کاس، ۱۹۶۵). دماهای بالا و رطوبت نسبی پایین هوای خشک کننده همراه با مقدار رطوبت اولیه زیاد منجر به افزایش امکان ایجاد شکستگی و شکافهای حاصل از تنش می گردد [۴].

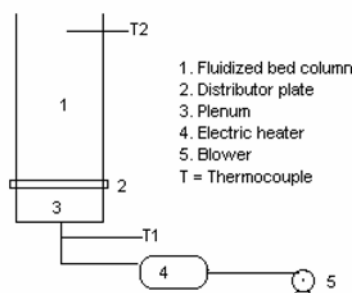
بمنظور توضیح پدیده ترک خوردگی دانه ها در طول فرایند خشک کردن دو نظریه ارائه شده است: نظریه فشردگی و نظریه چروکیدگی. نظریه فشردگی بر این اساس استوار است که پوشش دانه مقاومت بالاتری در مقابل انتقال رطوبت نسبت به قسمت درونی آن دارد. در حین فرایند خشک کردن فشردگی مولکولهای آب در پشت پوشش دانه اتفاق می افتد که این فشار موجب ترکیدگی آن می گردد (میرینگ و همکارانش، ۱۹۷۱، و فاست، ۱۹۷۵). نظریه چروکیدگی یا انقباض براساس تفاوت در میزان چروکیدگی پوشش دانه ای و قسمت درونی دانه (اندوسپرم سخت و نرم) در طول دوره خشک کردن استوار است. بمحض آنکه فرایند خشک کردن آغاز می شود سطح رویی پوشش دانه نسبت به درون آن سریعتر منقبض می شود و این امر باعث فشار اضافی در لایه های خارجی پوشش دانه و همزمان فشاری بر لایه درونی می گردد.

۶-۲ بررسی تحقیقات پیشین

در این بخش مطالب در مورد تحقیقات صورت گرفته در مورد خشک کن های بستر سیال و دستگاههای ساخته شده ارائه خواهد شد. سپس به بحث و بررسی نتایجی که محققین مختلف در زمینه مباحث سینتیک خشک کردن و سیال سازی بدست آورده اند، خواهیم پرداخت.

دستگاههای متعددی بر اساس تحقیقات انجام شده برای بکارگیری تکنولوژی خشک کردن بستر سیال محصولات کشاورزی، بویژه برنج ساخته شده است که بذکر چند نمونه از آنها می پردازیم:

▪ یک نمونه خشک کن بستر سیال توسط Inaba و همکاران (۲۰۰۶)، بمنظور بررسی فرایند انتقال جرم و حرارت در خشک کن ساخته شد. هوای مورد نیاز بوسیله یک دمنده تامین و پس از عبور از یک کوره حرارتی $2/5 \text{ kW}$ وارد محفظه خشک کن می شود [۵]. شماتیک سیستم خشک کن مربوطه در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. محفظه از جنس پلکسی گلس با ضخامت m $0/07$ و قطر داخلی m $0/175$ به طول m $1/2$ ساخته شد. صفحه توزیع کننده نیز از یک ورق پلکسی گلس به ضخامت m $0/06$ و 666 سوراخ به قطر m $0/02$ که با ترتیب مثلثی چیده شده بودند ساخته شد. آزمایشات مربوطه بر روی گندم بهاره قرمز و ذرت انجام گرفت. در این آزمایشات از هوا با دمای $^{\circ}\text{C}$ $40-65$ و سرعت m/s $1/63-1/95$ برای گندم و هوا با دمای $^{\circ}\text{C}$ $50-63$ و سرعت m/s $1/88-2/24$ برای ذرت با رطوبت اولیه $24-32\%$ بر پایه خشک استفاده شد.



شکل ۲-۵ شماتیک خشک کن بستر سیال ساخته شده توسط Inaba و همکاران (۲۰۰۶) [۵]

▪ در تحقیق دیگری که توسط Hamdullahpur و Hajidavallo (۱۹۹۹)، بمنظور مدلسازی انتقال همزمان جرم و حرارت در خشک کن بستر سیال مخصوص ذرات بزرگ مانند گندم انجام شد، یک دستگاه خشک کن بستر سیال ساخته شد تا صحت مدل پیشنهادی مورد آزمایش قرار گیرد [۱۱]. محفظه پلاستیکی این خشک کن دارای قطر داخلی ۰/۱۷۸ متر، ارتفاع ۱/۲ متر و ضخامت ۰/۰۰۷ متر بود. صفحه مشبک با ۸ درصد درجه آزادی، دارای ضخامت ۰/۰۰۶ متر و سوراخهای ۰/۰۰۲ متر با ترتیب مثلثی بود. گرم کننده هوا شامل ۵ المنت الکتریکی نواری شکل بود که توان هر کدام ۰/۵ کیلووات بود. دمای هوای ورودی سیال سازی با استفاده از کنترلر PI، کنترل می شد که در داخل سیستم جمع آوری اطلاعات^۱ قرار گرفته بود. سرعت جریان هوا با استفاده از یک مبدل فشار تفاضلی و یک صفحه منفذ دار اندازه گیری شد. توزیع دما در میان بستر مواد بوسیله چند ترموکوپل اندازه گیری شد که در ارتفاعهای مختلف بالای صفحه توزیع کننده نصب گردید. رطوبت هوای ورودی و خروجی با استفاده از رطوبت سنجی که به سیستم جمع آوری اطلاعات متصل بود، اندازه گیری می شد. قبل از هر آزمایش، سیستم در شرایط خالی در حدود ۴۵ دقیقه کار می کرد تا حالت پایدار بدست آید. نمونه های ۱۰ گرمی در هر دوره از مواد بستر برداشته می شد تا محتوای رطوبتی آنها بر اساس استاندارد انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا (برای مدت ۱۹ ساعت در یک اجاق^۲ در دمای °C ۱۳۰) اندازه گیری شد.

▪ یک خشک کن بستر سیال جریان متقاطع توسط Soponronnarit و Prachayawarakorn و Sripawatakul (۱۹۹۶)، طراحی و ساخته شد که نتایج حاصل از آن نشان داد که با در نظر گرفتن کیفیت برنج، رطوبت نهایی شلتوک نباید کمتر از ۲۳٪ بر پایه خشک باشد [۱۲]. همچنین نتایج حاصل از مدل سازی ریاضی ارائه شده بدین صورت بود: سرعت هوا ۲/۳ m/s، ارتفاع بستر ۱ m و میزان استفاده مجدد از هوای خروجی ۰/۸۰٪.

^۱ Data Logger

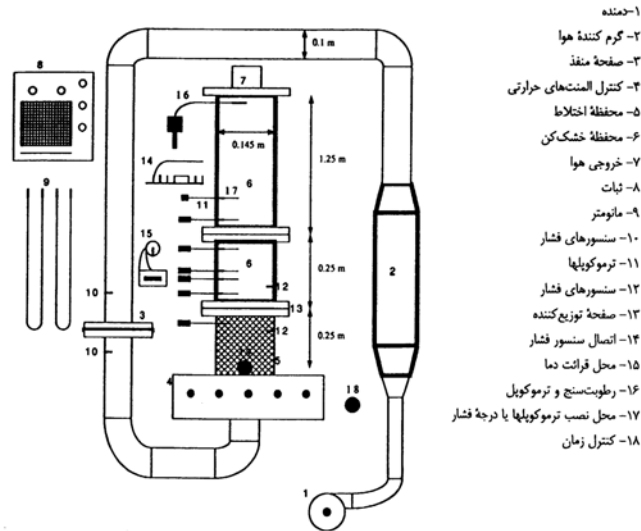
^۲ Oven

▪ خشک کن بستر سیال دیگری نیز توسط Dimatia و همکاران (۱۹۹۶) ساخته شد [۱۳]. در این دستگاه، هوا توسط دمنده سرعت متغیر، پس از عبور از یک کوره حرارتی که شامل پنج المنت حرارتی نواری شکل ۵۰۰ وات بود، تا درجه حرارت مورد نظر گرم می شد. هر کدام از المنت های مذکور بطور جداگانه کنترل می شدند. تمام این المنت ها در داخل یک محفظه عایق نصب می شدند. سپس هوای گرم وارد محفظه خشک کن، که تا ارتفاع مشخص با گندم پر شده بود، می شد. محفظه استوانه ای خشک کن از جنس پلاستیک شفاف مقاوم به حرارت ساخته شد که دارای قطر داخلی ۰/۱۴۵ متر و ارتفاع ۱/۵۰ متر بود. دمای هوای ورودی، خروجی و داخل محفظه توسط هفت ترموکوپل اندازه گیری و ثبت می شد. شش ترموکوپل در داخل محفظه در ارتفاعهای ۰/۰۳، ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ متری نسبت به صفحه توزیع کننده قرار داشتند. این دستگاه به منظور انجام کارهای آزمایشی روی گندم بهاره قرمز طراحی و ساخته شد. شماتیک اجزاء مختلف این خشک کن در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.

در تحقیقی که Dimatia و همکاران بر روی مشخصات سینتیکی خشک کردن گندم بهاره قرمز انجام دادند، دریافتند که با افزایش محتوای رطوبت مواد، سرعت حداقل سیال سازی بیشتر می شود. برای تعیین توزیع دما در داخل بستر ذرات در طول مدت سیال سازی، آزمایشهایی انجام شد و ترموکوپل های نصب شده در نقاط مختلف، دمای داخل بستر را اندازه گرفتند.

داده های حاصل نشان داد که دمای داخل بستر پس از مدت زمان اندکی یکسان می شود. در شروع انجام آزمایشات، دمای بستر به سرعت بالا می رود و با گذشت زمان، دمای بستر به آرامی افزایش می یابد تا به دمای گاز ورودی به محفظه خشک کن برسد. در دمای پایین تر از 39°C ، سرعت خشک کردن خیلی کمتر از دماهای بالاتر از 58°C بود. ممکن است گندم در دمای بالاتر نیز با سرعت بیشتری خشک شود اما دماهای بالاتر از 60°C صدمات زیادی به دانه ها وارد می کند. همچنین در این آزمایش، سه ارتفاع بستر در سرعت و دمای ثابت گاز خشک کننده نشان داد که در تمام شرایط مذکور سرعت خشک کردن نسبتاً بالا بوده که این مسئله بیانگر این نکته

است که توزیع دمای یکسانی در داخل بستر حتی با بزرگترین نسبت های ارتفاع به قطر بستر نیز حکمفرما است.



شکل ۲-۶ خشک کن بستر سیال ساخته شده برای خشک کردن گندم بهاره قرمز (Dimatia, ۱۹۹۶) [۱۳]

بمنظور مقایسه خشک کردن گندم معمولی با گندم بسیار مرطوب نیز آزمایشی صورت گرفت. از اینرو برای شبیه سازی گندم هایی که تحت شرایط محیطی مانند بارندگی به محتوای رطوبت بسیار بالا می رسیدند، نمونه ها را برای مدت ۲۴ ساعت قبل از خشک کردن خیس می کردند. این کار باعث می شد که گندم ها در ابتدا به محتوای رطوبت ۴۹ درصد پایه تر برسند. به این ترتیب یک نیروی داخل ذره ای در نتیجه رطوبت سطحی ایجاد می شد. در شروع سیال سازی، ذرات توده ای می شدند تا این که کشش سطحی به مرور کم می شد و رطوبت سطحی شروع به تبخیر شدن می کرد. سرعت خشک کردن گندم بسیار مرطوب از گندم معمولی سریعتر است.

▪ یک نمونه خشک کن بستر سیال بمنظور انجام کارهای تحقیقاتی در مقیاس آزمایشگاهی توسط Prasad و همکاران (۱۹۹۴) ساخته شد [۱۴]. این خشک کن برای خشک کردن شلتوک نیم جوش^۱ مورد استفاده قرار گرفت. طراحی این دستگاه بستر سیال غیر پیوسته بر مبنای

¹ Parboiled Rough Rice

حداکثر عمق ۰/۲ متر شلتوک انجام شد. ظرفیت دستگاه طراحی شده با توجه به جرم حجمی دانه، و قطر محفظه ۰/۱۴ متر حدود ۱/۸۸ کیلوگرم محاسبه شد. مقادیر حداقل سرعت سیال سازی با افزایش سرعت جریان هوا تخمین زده شد که در آن ارتفاع بستر تا ارتفاع ۰/۲۱۳۸ متر، درست قبل از سیال سازی کامل (انتقال مواد) انبساط پیدا می کرد. تخلخل بستر منبسط شده برابر ۰/۶۰۷ محاسبه شد. افت فشار در بستر سیال شده، برابر با ۱۱۲۹ پاسکال بدست آمد. حداقل سرعت سیال سازی مورد نیاز برای هوا، برابر ۱/۲۷ m/s محاسبه شد. حداقل دبی هوای مورد نیاز بمنظور سیال سازی دانه بصورت تئوری برابر ۰/۰۲ m³/s و در آزمایش، این مقدار برابر ۰/۰۳۳ m³/s بدست آمد. از یک دمنده با دبی ۰/۱۵ m³/s، که دور موتور آن توسط یک ترانسفورمر متغیر کنترل می شود، استفاده شد. از نظر تئوری، قدرت مورد نیاز موتور دمنده حدود ۰/۱۷ کیلووات محاسبه شد، که عملاً از یک دمنده سانتریفوژ با قدرت موتور ۰/۳۷۵ کیلووات استفاده گردید. برای گرم کردن هوا تا دمای ۸۰ °C، از نظر تئوری به المنت با توان حدود ۲/۲۰ کیلووات مورد نیاز بود که در عمل از المنت هایی با توان ۳ کیلووات استفاده شد. تغییر دما با استفاده از یک رئوستات انجام می گرفت که این کار با تغییر دادن ولتاژ ورودی به المنت ها انجام می شد. یک محفظه خشک کن استوانه ای از جنس پرس پکس^۱ که نوعی پلاستیک شفاف و مقاوم به حرارت است، به شکل استوانه ساخته شد تا بتوان حرکت دانه ها را در هنگام سیال سازی مشاهده کرد.

بعد از پر کردن محفظه خشک کن به وسیله برنج نیم جوش مرطوب، ارتفاع بستر قبل و بعد از شرایط سیال سازی اندازه گیری می شد. محفظه خشک کن به وسیله پیچ های قفلی به شاسی دستگاه نصب می شد. بوسیله این نوع اتصال می توان محفظه حاوی نمونه را بمنظور اندازه گیری مکرر وزن آن با مواد، برای تعیین محتوای رطوبت، براحتی از بدنه جدا نمود. با اندازه گیری دمای تر و خشک در داخل محفظه و به کمک منحنی سایکرومتریک، شرایط هوای محیط اندازه گیری

¹ Perspex

می شد. با اندازه گیری سرعت هوا در خروجی و ورودی محفظه و با داشتن اندازه مقاطع لوله و به کمک روابط موجود، مقدار دبی هوا بدست می آمد.

در آزمایشات انجام شده توسط Prasad و همکاران بر روی شلتوک نیم جوش معلوم شد با افزایش دما در هر عمقی از بستر مواد، منحنی خشک کردن شیب تندتری پیدا می کند که بیانگر افزایش در سرعت خشک کردن است. وقتی که عمق از ۰/۱ تا ۰/۲ متر افزایش می یابد، شیب منحنی خشک کردن کاهش می یابد که بیانگر کاهش سرعت خشک شدن و افزایش اندک در زمان خشک کردن می باشد. این امر یک پدیده کلی برای هر روش خشک کردن می باشد. آنها دریافتند که با افزایش ۱۰ درجه ای در دمای هوای خشک کردن، زمان خشک کردن حدود ۲۰ تا ۳۰ دقیقه کاهش پیدا می کند. همچنین در یک سرعت معین جریان هوا، با افزایش ۰/۰۵ متر به ارتفاع بستر دانه ها، زمان خشک کردن نیز ۵ تا ۱۰ دقیقه افزایش پیدا کرد. منحنی تغییرات سرعت خشک کردن بر حسب محتوای رطوبت بدست آمده از آزمایشات نیز نشان داد که در هنگام خشک کردن به روش بستر سیال و نیمه سیال و بستر ثابت، با کاهش عمق بستر مواد و افزایش دمای هوا، سرعت خشک کردن افزایش می یابد. در تمام مراحل، سرعت خشک کردن نزولی بود. نتایج این تحقیق نشان می دهد که برای خشک کردن شلتوک نیم جوش از محتوای رطوبت ۴۸ درصد تا ۱۵ درصد (پایه خشک)، کمترین زمان مورد نیاز برای حالت بستر نیمه سیال با ارتفاع بستر ۰/۱ متر، حدود ۲۸ دقیقه است و برای عمق ۰/۲ متر و دمای 80°C ، حدود ۳۸ دقیقه زمان لازم است. بنابراین با دو برابر کردن مقدار مواد، خشک کردن با صرف حدود ۱۰ دقیقه وقت اضافی انجام می شد. از اینرو عمق ۰/۲ متر برای شرایط بستر نیمه سیال مناسب بود.

▪ Sophonronarit و Prachayawarakorn (۱۹۹۳)، یک مدل ریاضی برای شبیه سازی خشک کن بستر سیال ارائه کردند. آنها در ادامه تحقیقات خود به بررسی امکان ساخت خشک کن بستر سیال غیر پیوسته پرداختند که در نهایت منجر به ساخت نمونه آزمایشگاهی گردید. نتایج حاصل از آزمایشات حاکی از آن بود که هنگامی که کیفیت برنج مد نظر باشد، دمای هوا نباید بیشتر

از 115°C و رطوبت نهایی شلتوک نباید کمتر از ۲۴-۲۵٪ بر پایه خشک باشد. آنها در سال ۱۹۹۵ موفق به ساخت نمونه آزمایشگاهی با ظرفیت خشک کردن 0.82 ton/h شلتوک شدند، که با استفاده از هوا با دمای $100-120^{\circ}\text{C}$ و سرعت $3/2\text{ m/s}$ ، ارتفاع بستر 0.1 m و استفاده مجدد از ۶۶٪ هوای خروجی از محفظه خشک کن، رطوبت برنج را از ۴۵٪ (بر پایه خشک) به ۲۴٪ کاهش می داد.

▪ Elephano و Magampon (۱۹۹۳)، پارامترهای موثر در پیش خشک کردن شلتوک برنج در یک خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. آزمایشها در محدوده محتوای رطوبت ۲۴-۲۹٪ بر پایه تر انجام شد. نتایج حاصل از آزمایشات حاکی از آن بود که دمای هوای خشک کننده و زمان خشک کردن تاثیر قابل توجهی روی مشخصه های خشک کردن و سفید کردن دارد. در حالیکه تاثیر سرعت هوا کمتر است. با افزایش دمای هوا سرعت خشک کردن افزایش می یابد.

▪ بمنظور بهینه سازی برخی از خشک کن ها به کمک روش بستر سیال نیز کارهایی صورت گرفته است. Nagahiro و همکاران (۱۹۹۲)، طی تحقیقی روش بستر سیال را بصورت تلفیقی، همراه با خشک کن دوار مورد استفاده قرار دادند [۱۶]. خشک کن های دوار بطور طبیعی دارای معایبی از جمله: کاهش کیفیت دانه و افزایش خسارات وارده به آن به سبب تماس مستقیم با سطح داخلی استوانه دوار و اعمال حرارت بالا به آن، می باشند. بمنظور بر طرف کردن مشکلات فوق، کاربرد خشک کن بستر سیال استوانه ای پیشنهاد شد. مطالعه آزمایشگاهی بر روی یک نمونه از خشک کن پیشنهاد شده برای خشک کردن شلتوک نشان داد که در مقایسه با خشک کن دوار دارای مزایای بیشتری می باشد که عبارتند از: ۱- افزایش سرعت خشک کردن. ۲- به علت یکنواختی رطوبت، احتمال شکست دانه ها یا ضایعات آنها کاهش می یابد. ۳- افزایش کیفیت محصول از لحاظ عطر و طعم. آنها برای گندم دمای 40°C تا 45°C و دبی هوای 0.06

مترمکعب بر ثانیه به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم و برای سویا نیز ۲۵ تا ۲۷ °C و دبی ۰/۰۶ متر مکعب بر ثانیه به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم را پیشنهاد کردند.

▪ نتایج آزمایشگاهی حاصل از خشک کن بستر سیال غیر پیوسته که توسط Sutherland و Ghaly (۱۹۹۰)، ساخته شد نشان داد که کیفیت نهایی برنج با محتوای رطوبت نهایی آن متناسب است [۱۷]. آنها به این نتیجه رسیدند که خشک کردن شلتوک تا رطوبت نهایی ۲۰/۵-۲۸/۲٪ (بر پایه خشک) موجب بهبود کیفیت برنج تا ۵۸-۶۱٪ می شود، در حالی که وقتی شلتوک تا رطوبت کمتر از ۲۰٪ خشک شود کیفیت برنج ۱۵-۲۴٪ خواهد بود. بررسی های آزمایشگاهی انجام گرفته نشان داد که با اعمال محدوده دمایی °C ۴۰-۹۰ می توان بدون ایجاد تلفات، شلتوک را از محتوای رطوبت ۲۴٪ تا ۱۸٪ رساند.

▪ طی آزمایشی که Utku و Uckan (۱۹۸۶) انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که در روش خشک کردن بستر سیال اعمال دماهای زیر °C ۲۰ و بالای °C ۶۵ بترتیب ۱۵ و ۵۴ درصد بر سرعت خشک کردن می افزاید [۱۸]. آنها همچنین دریافتند که این افزایش سرعت در خشک کردن به روش بستر سیال از افزایش سطح تماس محصولات با هوا ناشی می شود.

▪ استفاده از بستر سیال به عنوان روشی جهت پیش خشک کردن دانه های مرطوب (رطوبت بیش از ۲۵٪) قبل از خشک کردن کامل در یک برج خشک کن (سیلو) توسط Chizhikov و Golubkovich (۱۹۸۰)، مورد تحقیق قرار گرفت [۱۹]. بدین ترتیب که ابتدا دانه ها در خشک کن بستر سیال اندکی خشک می شدند بطوری که حداقل ۵ درصد از محتوای رطوبت آنها کاسته می شد. با استفاده از این روش می توان ظرفیت سیلو را تا حدود ۷۰٪ افزایش داد. حذف سریع رطوبت سطحی خواص توده دانه را تغییر داده و ظرفیت انتقال مواد را تا حدود ۵۰٪ افزایش می دهد. آنها ضمن بیان مطالب فوق نتیجه گرفتند که پیش خشک کردن دانه در یک بستر سیال شده موجب افزایش ظرفیت خشک کن و بهبود کارایی آن می شود. نمونه های اولیه این خشک کن دارای صفحه ۲×۲ m بودند که هوا از محفظه زیرین آن دمیده می شد و با ظرفیت ۲/۵ تن در

ساعت، حدود ۴٪ از رطوبت دانه ها کاسته و دمای آنها را تا 45°C افزایش می داد. ضخامت بستر دانه ها 0.28 m و سرعت جریان هوا حدود $2/6\text{ m/s}$ بود.

جدول ۲-۵ تحقیقات انجام شده بر روی خشک کن بستر سیال دانه های نباتی

توضیحات	سال	محققین
بررسی فرایند انتقال جرم و حرارت در خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی بر روی گندم بهاره قرمز و ذرت	۲۰۰۶	Inaba و همکاران
ساخت خشک کن بستر سیال بمنظور مدلسازی انتقال همزمان جرم و حرارت در خشک کردن ذرات بزرگ مانند گندم	۱۹۹۹	Hamdullahpur و Hajidavallo
خشک کن بستر سیال جریان متقاطع شلتوک برنج	۱۹۹۶	Prachayawarakorn و Soponronnarit و Sripawatakul
بررسی مشخصات سینتیکی خشک کردن گندم بهاره قرمز بوسیله خشک کن بستر سیال	۱۹۹۶	Dimatia و همکاران
خشک کن بستر سیال غیر پیوسته آزمایشگاهی شلتوک برنج	۱۹۹۴	Prasad و همکاران
خشک کن بستر سیال غیر پیوسته آزمایشگاهی شلتوک برنج	۱۹۹۳	Prachayawarakorn و Soponronnarit
بررسی پارامترهای موثر در پیش خشک کردن شلتوک برنج در یک خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی	۱۹۹۳	Elephano و Magampon
بهینه سازی خشک کن ها به کمک بکارگیری روش بستر سیال	۱۹۹۲	Nagahiro و همکاران
خشک کردن بستر سیال شلتوک برنج در شرایط ارتفاع بستر و دما و سرعت هوای مختلف	۱۹۹۱	Driscoll و Tumaming
خشک کن بستر سیال غیر پیوسته آزمایشگاهی شلتوک برنج	۱۹۹۰	Ghaly و Sutherland
خشک کردن بستر سیال شلتوک برنج در شرایط ارتفاع بستر و دما و سرعت هوای مختلف	۱۹۸۶	Uckan و Ulku
استفاده از بستر سیال به عنوان روشی جهت پیش خشک کردن دانه های مرطوب	۱۹۸۰	Chizhikov و Golubkovich

فصل سوم

طراحی و ساخت

در این فصل ابتدا مباحث مربوط به طراحی مکانیکی و حرارتی دستگاه با توجه به خواص بیوفیزیکی محصولات مورد بررسی قرار می گیرد و سپس نقشه ها و اشکال مربوط به دستگاه ساخته شده به همراه روش ساخت آن ارائه می گردد.

۳-۱ سرعت حداقل سیال سازی

همانگونه که در بخش قبل بیان شد با افزایش سرعت جریان هوا، بستر مواد به تدریج سست شده و شروع به شناور شدن می کند. شروع سیال سازی زمانی رخ می دهد که وزن ذرات (W) با نیروی کشش اعمال شده بوسیله حرکت رو به بالای گاز (F_D) برابر شود. F_D از حاصلضرب مساحت مقطع عرضی بستر (A_b) در افت فشار بستر (ΔP_b) بدست می آید:

$$F_D = \Delta P_b \times A_b \quad (1-3)$$

W وزن ذرات، از رابطه زیر بدست می آید:

$$W = (A_b \cdot L_{mf}) \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g \quad (2-3)$$

با ترکیب رابطه های (۱-۳) و (۲-۳) خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g \quad (3-3)$$

ΔP_b افت فشار ناشی از ستون مواد (Pa)، L_{mf} ارتفاع بستر مواد در شرایط حداقل سیال سازی (m)، ε_{mf} تخلخل در شرایط حداقل سیال سازی، ρ_g جرم حجمی گاز (Kg/m^3) و ρ_s جرم حجمی مواد جامد (Kg/m^3) می باشد.

با افزایش سرعت سیال تخلخل و همچنین افت فشار ناشی از بستر مواد افزایش می یابد. هنگامی که سرعت به اندازه ای می رسد که حباب های گاز ظاهر شوند، افزایش افت فشار متوقف می گردد. به این سرعت کمینه سرعت سیالی یا سرعت حداقل سیال سازی، U_{mf} ، گفته می شود. روابط متعددی برای محاسبه سرعت حداقل سیال سازی در منابع موجود می باشد که به ذکر مهمترین آنها می پردازیم:

ارگن^۱ رابطه زیر را برای افت فشار ناشی از بستر سیال تعریف کرد:

$$\frac{\Delta P_b}{L} = 150 \frac{\eta \cdot U \cdot (1 - \varepsilon_{st})^2}{\varepsilon_{st}^3 \cdot (\psi \cdot dp)^2} + 1.75 \frac{\rho_g \cdot U^2 \cdot (1 - \varepsilon_{st})}{\varepsilon_{st}^3 \cdot \psi \cdot dp} \quad (۴-۳)$$

ΔP_b افت فشار ناشی از ستون مواد (Pa)، L ارتفاع بستر مواد (m)، ε_{st} تخلخل استاتیک، η ویسکوزیته سیال (Ns/m^2)، U سرعت سیال (m/s)، dp قطر ذرات (m)، ρ_g جرم حجمی گاز (kg/m^3) و ψ کرویت دانه های بستر می باشد. در بخش بعد به تفصیل در مورد افت فشار بستر توضیح داده خواهد شد. همانگونه که گفته شد ε_{mf} تخلخل بستر در حالت دینامیک می باشد که می توان آن را از طریق آزمایش بدست آورد. با ترکیب معادله (۳-۳) و معادله ارگن و با جایگزینی ε_{mf} با ε_{st} ، رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{1.75}{\psi \cdot \varepsilon_{st}^3} \left(\frac{\rho_g \cdot U_{mf} \cdot dp}{\eta} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\psi^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{\rho_g \cdot U_{mf} \cdot dp}{\eta} \right) = \frac{\rho_g dp^3 (\rho_s - \rho_g) g}{\eta^2} \quad (۵-۳)$$

Kunni و Levenspiel (۱۹۹۱)، رابطه فوق را به صورت زیر تعریف کردند [۲۰]:

$$\frac{1.75}{\psi \cdot \varepsilon_{mf}^3} \text{Re}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\psi^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3} \text{Re} = \text{Ar} \quad (۶-۳)$$

عدد ارشمیدس (Ar) که همان عبارت سمت راست معادله (۵-۳) می باشد و همچنین عدد رینولدز بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\text{Ar} = \frac{\rho_g dp^3 (\rho_s - \rho_g) g}{\eta^2} \quad (۷-۳)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_g \cdot U_{mf} \cdot dp}{\eta} \quad (۸-۳)$$

با توجه به رابطه (۶-۳) می توان نوشت:

$$A \cdot \text{Re}_{mf}^2 + B \cdot \text{Re}_{mf} = \text{Ar} \quad (۹-۳)$$

که:

^۱ Ergun

$$A = \frac{1.75}{\psi \cdot \varepsilon_{mf}^3} \quad (10-3)$$

$$B = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\psi^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3} \quad (11-3)$$

به این ترتیب به یک معادله درجه دوم بر حسب Re می رسیم که به این ترتیب می توان U_{mf} را محاسبه کرد.

Saxena و Vogel (۱۹۷۷)، رابطه دیگری برای سرعت حداقل سیال سازی بیان کردند [۲۱]:

$$U_{mf} = \frac{\eta}{\rho_g \cdot dp} [(25.28^2 + 0.0571 Ar)^{1/2} - 25.28] \quad (12-3)$$

این رابطه برای تمامی رینولدزها برقرار می باشد.

Wen و Yu (۱۹۶۶)، رابطه زیر را برای سرعت حداقل سیال سازی بیان کردند [۲۲]:

$$U_{mf} = \rho_g \cdot dp [(33.7^2 + 0.0408 Ar)^{1/2} - 33.7] \quad (13-3)$$

در این رابطه هیچ محدودیتی برای عدد رینولدز وجود ندارد.

Goroshko و همکاران (۱۹۵۸)، نیز رابطه زیر را برای کمینه سرعت سیالی تعریف کردند [۲۳]:

$$U_{mf} = \frac{Ar \cdot \eta}{\rho_g \cdot dp \left[\frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} + \left(\frac{1.75 Ar}{\varepsilon_{mf}^3} \right)^{1/2} \right]} \quad (14-3)$$

Acrov و Todes (۱۹۶۸)، رابطه ای به صورت زیر تعریف کردند [۹]:

$$U_{mf} = \frac{Ar \cdot \eta \cdot \varepsilon^{4.75}}{\rho_g \cdot dp (18 + 0.61 \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4.75}})} \quad (15-3)$$

مقادیر U_{mf} حاصل از روابط پیشنهاد شده در جدول ۱-۳ ارائه شده است.

جدول ۱-۳ مقادیر کمینه سرعت سیال سازی بدست آمده از روابط موجود، در دمای هوای محیط (۲۱ °C)

سرعت حداقل سیال سازی (m/s)	
Kunni و Levenspiel	۰/۷۸
Vogel و Saxena	۱/۱۶
Todes و Acrov	۱/۸۲
Yu و Wen	۱/۰۳

۲-۳ سرعت حامل

سرعت سیال هنگامی که بتواند ذرات ماده را از محفظه خارج کند، سرعت حامل یا سرعت انتقال ماده، U_{gt} ، نامیده می شود. در عمل سرعت مورد استفاده در سیال سازی باید بین سرعت حداقل سیال سازی و سرعت حامل باشد. روابط متعددی برای محاسبه سرعت حامل پیشنهاد شده است که مهمترین آنها در زیر آورده شده است:

Romankov و Rashkovskaya (۱۹۷۹)، رابطه زیر را برای سرعت حامل بر حسب سرعت سیال سازی و عدد ارشمیدس پیشنهاد کردند [۷]:

$$\frac{U_{mf}}{U_{gt}} = 0.1175 - \frac{0.1046}{1 + 0.00373Ar^{0.6}} \quad (۱۶-۳)$$

Popper و Pinchbeck (۱۹۵۶)، روابط تجربی زیر را برای نسبت سرعت حامل بر کمینه سرعت سیالی پیشنهاد کردند [۲۴]:

$$\frac{U_{gt}}{U_{mf}} = 91.6 \quad \text{برای ذرات خیلی ریز و } Re < 0.4 \quad (۱۷-۳)$$

$$\frac{U_{gt}}{U_{mf}} = 8.72 \quad \text{برای ذرات زبر و سخت و } Re > 1000$$

Marcus و همکاران (۱۹۹۰) صحت روابط بالا را تحقیق کرده و به نتایج مشابه رسیدند.

در صورتی که سرعت حداقل سیال سازی معلوم نباشد می توان با استفاده از خواص مواد سرعت انتقال آنها را طبق رابطه زیر محاسبه نمود [۳]:

$$U_{gt} = \left(\frac{4g \cdot dp(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g \cdot \zeta} \right)^{1/2} \quad (۱۸-۳)$$

U_{gt} سرعت انتقال مواد (m/s)، g شتاب ثقل (m/s^2)، dp قطر ذره (m)، ρ_s جرم حجمی مواد (Kg/m^3)، ρ_g جرم حجمی گاز (Kg/m^3) و ζ ضریب اصطکاک داخلی ذرات است.

Oleviskii (۱۹۵۵)، رابطه ای بر حسب Re_t و عدد ارشمیدس پیشنهاد کرد که عبارتست از [۲۵]:

$$\frac{\pi}{6} Ar = 3\pi Re_t + \sqrt{3} Re_t^{1.5} + \frac{1}{8} Re_t^2 \quad 0 < Re_t < 6000 \quad (19-3)$$

$$Re_t = \frac{\rho_g U_{gt} dp}{\eta}$$

Goroshko (۱۹۵۸)، رابطه مشابهی برای $Ar < 10^4$ پیشنهاد کرد [۲۳]:

$$Re_t = \frac{Ar}{18 + 0.61\sqrt{Ar}} \quad (20-3)$$

مقادیر بدست آمده U_{gt} برای شلتوک در جدول ۳-۲ آورده شده است.

جدول ۳-۲ مقادیر سرعت حامل بدست آمده از روابط موجود، در دمای هوای محیط (۲۱ °C)

سرعت حداقل سیال سازی (m/s)	
Romankov و Rashkovskaya	$8/88 \cdot U_{mf}$
Marcus و همکاران	$8/72 \cdot U_{mf}$
Oleviskii	۹/۳۸
Goroshko	۸/۴۵

۳-۳ افت فشار بستر ثابت

همانگونه که در بخش ۱-۳ اشاره شد افت فشار ناشی از ستون در حالت بستر ثابت بوسیله

معادله ارگن محاسبه می شود:

$$\frac{\Delta P_b}{L} = 150 \frac{\eta \cdot U \cdot (1 - \varepsilon_{st})^2}{\varepsilon_{st}^3 \cdot (\psi \cdot dp)^2} + 1.75 \frac{\rho_g \cdot U^2 \cdot (1 - \varepsilon_{st})}{\varepsilon_{st}^3 \cdot \psi \cdot dp} \quad (21-3)$$

ΔP_b افت فشار ناشی از ستون مواد (pa)، L ارتفاع بستر مواد (m)، ε_{st} تخلخل استاتیک، η

ویسکوزیته سیال (Ns/m^2)، U سرعت سیال (m/s)، dp قطر ذرات (m)، ρ_g جرم حجمی گاز

(kg/m^3) و ψ کرویت دانه های بستر می باشد. عدد رینولدز که مشخصه رژیم جریان می باشد، به

صورت زیر تعریف می شود:

$$Re = \frac{\rho_g \cdot U \cdot (\psi \cdot dp)}{\eta} \quad (22-3)$$

معادله (۳-۲۱) در $20 < Re < 1000$ صادق می باشد، زیرا با افزایش سرعت سیال افت فشار بستر ذرات افزایش یافته و بتدریج ذرات شروع به حرکت می کنند تا در سیال شناور شوند. برای $Re < 20$ ، اولین عبارت سمت راست معادله ارگن، افت فشار ناشی از بستر مواد را نشان می دهد:

$$\frac{\Delta P_b}{L} = 150 \frac{\eta \cdot U (1 - \varepsilon_{st})^2}{\varepsilon_{st}^3 (\psi \cdot dp)^2} \quad Re < 20 \quad (23-3)$$

برای $Re > 1000$ نیز دومین عبارت سمت راست معادله (۳-۲۱) تعیین کننده افت فشار بستر خواهد بود:

$$\frac{\Delta P_b}{L} = 1.75 \frac{\rho_g \cdot U^2 (1 - \varepsilon_{st})}{\varepsilon_{st}^3 \cdot \psi \cdot dp} \quad Re > 1000 \quad (24-3)$$

Carmen و Kozeny (۱۹۳۷)، رابطه زیر را برای محاسبه افت فشار ناشی از بستر مواد پیشنهاد کردند [۶]:

$$\Delta P_b = 180 \frac{U \cdot L \cdot \eta (1 - \varepsilon_{st})^2}{\varepsilon_{st}^3 (dp \cdot \psi)^2} \quad (25-3)$$

مقادیر محاسبه شده افت فشار در شرایط بستر ثابت در جدول ۳-۳ ارائه شده است.

جدول ۳-۳ مقادیر افت فشار بدست آمده از روابط تئوری در ارتفاع بسترهای مختلف، دمای هوای $21^\circ C$

		افت فشار بستر مواد در 0.8 m/s (pa)				
		۴ cm	۵ cm	۶ cm	۷ cm	۸ cm
	Ergun	۲۵۱	۳۱۳/۷	۳۷۶/۵	۴۳۹/۲	۵۰۲
و	Carmen	۱۱۰/۳	۱۳۷/۹	۱۶۵/۵	۱۹۳	۲۲۰/۶
	Kozeny					

۴-۳ ساختمان خشک کن

۴-۳-۱ ابعاد محفظه خشک کن

همانگونه که در بخش های قبل بیان شد تغییرات سرعت سیال در خشک کن بستر سیال در محدوده سرعت حداقل سیال سازی و سرعت انتقال مواد می باشد:

$$U_{mf} < U_g < U_{gt} \quad (26-3)$$

بنابراین می توان نشان داد سطح مقطع محفظه خشک کن در محدوده زیر قرار دارد:

$$\frac{W_{gs}}{\rho_g \cdot U_{gt}} < A < \frac{W_{gs}}{\rho_g \cdot U_{mf}} \quad (27-3)$$

W_{gs} دبی جرمی هوای خشک (kg/s)، ρ_g جرم حجمی سیال ورودی (kg/m^3)، U_{gt} سرعت انتقال

مواد (m/s)، U_{mf} سرعت حداقل سیال سازی (m/s) می باشد. مقدار دبی جرمی هوای خشک را

می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$W_g = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{U_g}{v_g} \quad (28-3)$$

D قطر خروجی دمنده (m)، U_g سرعت هوا در خروجی دمنده (m/s)، v_g حجم مخصوص هوا که

برابر $0.91 \text{ m}^3/\text{kg}$ می باشد.

بدین ترتیب با استفاده از رابطه (27-3) داریم:

$$0.158 \text{ m}^2 < A < 0.604 \text{ m}^2 \quad (29-3)$$

و بنابراین:

$$0.141 \text{ m} < D < 0.277 \text{ m}$$

با توجه به مقادیر محاسبه شده و محدودیت های دمایی برای ساخت دستگاه قطر محفظه خشک

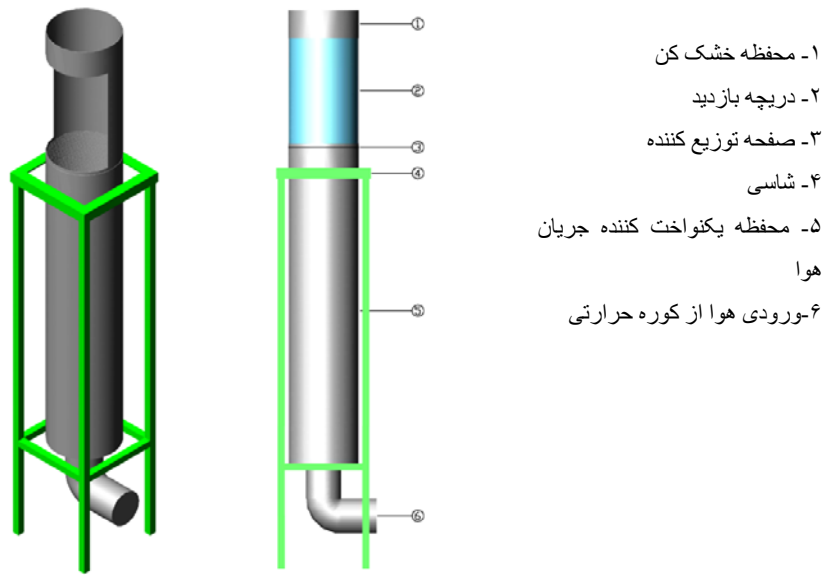
کن 0.2 m انتخاب شد. محفظه خشک کن از ورق آلومینیوم با ضخامت 0.008 m ساخته شد و

یک دریچه بازدید بمنظور مشاهده بهتر مراحل سیال سازی روی آن تعبیه گردید. محفظه

یکنواخت کننده جریان هوا از ورق فلزی با ضخامت 0.01 m ساخته شد و به شاسی متصل

گردید. شکل ۱-۳ شماتیک دستگاه را نشان می دهد. تصاویر و نمای مربوط به بدنه دستگاه در

پیوست ۳ آورده شده است.



- ۱- محفظه خشک کن
- ۲- دریچه بازدید
- ۳- صفحه توزیع کننده
- ۴- شاسی
- ۵- محفظه یکنواخت کننده جریان هوا
- ۶- ورودی هوا از کوره حرارتی

شکل ۱-۳ شماتیک ساختمان دستگاه طراحی شده

۳-۴-۲ دمنده

برای انتخاب نوع، اندازه و سرعت مناسب دمنده، مقادیر دبی و فشار هوا مورد نیاز می باشد. توصیه شده است برای خشک کن هایی که به فشار هوای بالا نیاز دارند از دمنده های سانتریفوژی و در شرایطی که نیاز به دبی بالا باشد از دمنده های محوری استفاده شود.

با توجه به نیازهای افت فشار و دبی هوا که در بخشهای قبل محاسبه شد، نیاز به دمنده ای بود که حداقل فشار استاتیک $1826/87 \text{ pa}$ (حداکثر افت فشار برای سیال سازی شلتوک در ارتفاع بستر 8 cm) و دبی هوای $0/204 \text{ m}^3/\text{s}$ (در شرایط سرعت حامل) بوجود آورد. با توجه به خطاهای حاصل از افت فشار مسیر و محاسبات و اندازه گیری ها ضریب اطمینان $1/5$ در نظر گرفته شد. بنابراین افت فشار و دبی هوای مورد نیاز برای انتخاب دمنده بترتیب $2283/58 \text{ pa}$ و $0/306 \text{ m}^3/\text{s}$ بدست آمد. با توجه به مقادیر محاسبه شده و با استفاده از نرم افزار AeolusPlus مربوط به شرکت Comefri، دمنده مدل TLZ 180 از نوع سانتریفوژی با پره های جلوگرد باریک انتخاب گردید (پیوست ۳). صحت انتخاب دمنده با آزمایش مستقیم بررسی شد.

قدرت مورد نیاز موتور را می توان با توجه به رابطه زیر محاسبه نمود:

$$P_{motor} = W_g \cdot p_s \quad (30-3)$$

P_{motor} نشان دهنده قدرت موتور، W_g دبی هوا (m^3/s)، و p_s فشار استاتیک (pa) می باشد. با توجه به روابط بالا، موتوری با توان 0.55 kW انتخاب شد. منحنی های عملکرد فن و مشخصات مربوط به آن در پیوست ۳ ارائه شده است.

۳-۴-۳ صفحه توزیع کننده

بمنظور حصول یک جریان یکنواخت در مقطع عرضی بستر، صفحه سوراخداری که افت فشار مناسب (ΔP_d) ایجاد می کند، بکار گرفته شد. طبق بررسی های Brauer و Mewes (۱۹۷۲)، در شرایط حداقل سیال سازی، افت فشار صفحه توزیع کننده بین 0.2 تا 0.4 افت فشار بستر مواد می باشد [۲۷]. افت فشار بستر مواد، ΔP_b ، از رابطه (۳-۲۵) محاسبه می شود.

طبق نظریه Kunii و Levenspiel (۱۹۹۱)، با افزایش ΔP_d ، یکنواختی بیشتری در جریان گاز ورودی به محفظه ایجاد می شود [۲۰]. اما مشکل این امر، مصرف زیاد انرژی و هزینه بالای دمنده مربوطه می باشد. بنابراین می بایست حداقل ΔP_d بمنظور یکنواخت کردن سیال سازی در شرایط مورد نظر محاسبه شود. روابط زیادی با توجه به ارتباط بین ΔP_d و ΔP_b پیشنهاد شده که مهمترین آنها عبارتند از:

Harrison و Davidson (۱۹۶۳)، رابطه زیر را بیان کردند [۲۸]:

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_b} = 0.15 \quad : 1 \ll \frac{V_g}{V_{mf}} \ll 2 \quad (31-3)$$

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_b} = 0.015 \quad : \frac{V_g}{V_{mf}} \gg 2$$

کریزی و کورشی معادله زیر را برای مقدار بهینه این نسبت براساس گزارشات آزمایشگاهی پیشنهاد کرده اند [۸]:

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_b} = 0.01 + 0.2 \left[1 - \exp\left(-0.5 \frac{D_o}{L}\right) \right] \quad (32-3)$$

ΔP_d افت فشار ناشی از توزیع کننده گاز، ΔP_b افت فشار ناشی از بستر، D_0 قطر سوراخها و L ارتفاع بستر می باشد.

همانگونه که در بخش ۳-۴ ذکر شد، افت فشار ناشی از صفحه توزیع کننده را می توان از رابطه زیر تعیین کرد [۴]:

$$\Delta p_d = 1.04 \left(\frac{d_0}{b} \right)^{0.25} \cdot \frac{U_{go}^2 \rho_{go}}{2} \quad (3-33)$$

که d_0 قطر سوراخهای شبکه، b ضخامت صفحه توزیع کننده، U_{go} سرعت گاز در داخل سوراخها، ρ_{go} چگالی گاز در داخل سوراخها است.

و

$$U_{go} = \frac{U_g}{\beta} \quad (3-34)$$

مقادیر افت فشار صفحه توزیع کننده بدست آمده از روابط فوق در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

جدول ۳-۴ مقادیر افت فشار صفحه توزیع کننده بدست آمده از روابط موجود

ارتفاع بستر	افت فشار صفحه توزیع کننده (pa)				
	Brauer و Mewes	Harrison و Davidson	Fan و Cao	کریزی و کورشی	تئوری منفذها
۰/۰۴ m	۳۰۳/۶	۱۵/۱	۷۰/۸	۱۳/۹	
۰/۰۵ m	۳۷۹/۵	۱۹	۸۸/۵	۱۷/۳	
۰/۰۶ m	۴۵۵/۳	۲۲/۸	۱۰۶/۲	۲۰/۸	۴۱۶/۹
۰/۰۷ m	۵۳۱/۲	۲۶/۶	۱۲۳/۹	۲۴/۳	
۰/۰۸ m	۶۰۷/۱	۳۰/۳	۱۴۱/۶	۲۷/۷	

برای طراحی صفحه توزیع کننده می توان از تئوری منفذ نیز استفاده کرد. پس از محاسبه ΔP_d که در بالا ذکر شد بدین ترتیب عمل می گردد:

سرعت جریان گاز گذرنده از میان منافذ را می توان به کمک رابطه زیر تعیین کرد:

$$U_{go} = C_o \left[\frac{2\Delta P_d}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad (35-3)$$

U_{go} سرعت هوای گذرنده از میان منافذ صفحه توزیع کننده (m/s)، C_o ضریب منفذ، ΔP_d افت فشار صفحه توزیع کننده (pa)، ρ_g جرم حجمی گاز (kg/m^3) می باشد. با استفاده از جدول ۳-۵ و عدد Re_t ، می توان ضریب منفذ، C_o ، را تعیین کرد.

جدول ۳-۵ انتخاب مقادیر مناسب ضریب منفذ بر حسب عدد رینولدز [۲۹]

Re_t	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	>۳۰۰۰
$C_{d,or}$	۰/۶۸	۰/۷	۰/۶۸	۰/۶۴	۰/۶۱	۰/۶

به کمک رابطه زیر می توان تعداد و قطر سوراخهای صفحه توزیع کننده را تعیین نمود:

$$U_g = \frac{\pi}{4} d_o^2 \cdot U_{go} \cdot n_o \quad (36-3)$$

d_o قطر سوراخها (m) و n_o تعداد سوراخها در واحد سطح صفحه توزیع کننده می باشد. با توجه به رابطه بالا، مقادیر بهینه قطر و تعداد سوراخها تعیین می گردد. سوراخهای خیلی بزرگ سبب توزیع غیر یکنواخت گاز و سوراخهای خیلی کوچک موجب مسدود شدن مسیر هوا و ایجاد افت فشار بسیار زیاد می شود.

b ضخامت صفحه توزیع کننده (m) را نیز می توان بوسیله رابطه زیر (Viktorin, ۱۹۸۸) محاسبه کرد:

$$b = d_o \left(\frac{1.04 U_{go}^2 \cdot \rho_g}{754} \right)^4 \quad (37-3)$$

۳-۴-۴ کوره حرارتی

بمنظور تامین حرارت مورد نیاز برای گرم کردن هوای خشک کننده از یک کوره حرارتی الکتریکی استفاده شد. بمنظور سهولت کاربرد و کنترل بهتر دما، المنت های حرارتی بکار گرفته

شدند. توان المنتها را می توان از رابطه ترمودینامیکی زیر که توسط Lang (۱۹۹۱) پیشنهاد شد، محاسبه نمود:

$$E_h = \frac{W_g (C_{pg} + C_{pv} \cdot Y)(T_{in} - T_{amb})}{V_{gs}} \quad (3-38)$$

E_h توان حرارتی المنتها (W)، W_g دبی هوای ورودی به کوره (m^3/s)، C_{pg} گرمای ویژه هوا ($J/kg^\circ C$)، C_{pv} گرمای ویژه بخار ($J/kg^\circ C$)، Y رطوبت مطلق هوا (kg/kg)، T_{in} دمای ورود به محفظه خشک کن ($^\circ C$)، T_{amb} دمای محیط ($^\circ C$) و V_{gs} حجم رطوبت هوای خشک ($m^3/kg_{dry\ air}$) می باشد. Y و V_{gs} را می توان با استفاده از نمودار سایکرومتریک در شرایط هوای محیط تعیین نمود. بدین ترتیب با توجه به رابطه (۳-۳۸) توان مورد نیاز کوره حرارتی W ۳۹۹۱/۶ محاسبه شد (پیوست ۳).

۳-۴-۵ محفظه یکنواخت ساز هوا

طول موثر مجرا عبارت است از طولی از مجرا که هوا پس از آن با سرعت مشخص به شرایط پایدار می رسد. شرایط پایا هنگامی ایجاد می شود که پروفیل سرعت در مجرای هوا متقارن باشد. در این حالت هد ایجاد شده توسط دمنده نیز به صورت موثرتری اعمال می شود. در صورتی که طول مجرا از طول موثر کمتر باشد شرایط پایدار در پروفیل سرعت بوجود نیامده و فشار ایجاد شده موثر نمی باشد.

طول موثر مجرا تابعی از سطح دمنده و سطح خروجی می باشد. محفظه یکنواخت ساز هوا به گونه ای طراحی شده است که فاصله بین خروجی کوره (ورودی محفظه یکنواخت ساز) تا زیر محفظه سیال سازی حدود $0.9\ m$ باشد تا حتی الامکان از ایجاد اغتشاش در جریان هوا جلوگیری کند.

۳-۴-۶ شاسی

بمنظور استقرار محفظه های خشک کن، شاسی با مشخصات نشان داده شده در پیوست ۳ طراحی و ساخته شد.

فصل چهارم

آزمایش و اندازه گیری

در این بخش به شرح مجموعه آزمایشاتی که به منظور بررسی عملکرد و صحت طراحی دستگاه انجام شد می پردازیم. سپس ابزار اندازه گیری که برای انجام این آزمایشها استفاده شد و همچنین روش بکارگیری آنها را بیان می کنیم.

۴-۱ آزمایشهای انجام شده

۴-۱-۱ اندازه گیری افت فشار ناشی از صفحه توزیع کننده

همانگونه که در بخش ۳-۵-۳ ذکر شد، صفحه مشبکی با مشخصات مذکور تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. این صفحه دارای سوراخهایی به شکل دایره با قطر 0.003 m با ترتیب مثلثی و ضخامت 0.001 و درجه آزادی 8% می باشد. همانگونه که در بخشهای قبل بیان شد، افت فشار کل که توسط فشار سنج تفاضلی اندازه گیری می شود، برابر مجموع افت فشار ناشی از ارتفاع ستون مواد و افت فشار صفحه توزیع کننده می باشد. بنابراین برای بدست آوردن افت فشار ستون مواد، ابتدا افت فشار صفحه توزیع کننده را بدست آورده سپس آن را از افت فشار کل کم می کنیم.

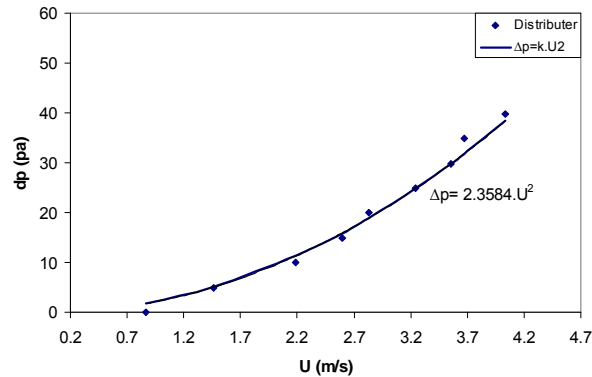
برای بدست آوردن افت فشار ناشی از صفحه توزیع کننده، محفظه خالی از مواد را روی دستگاه قرار داده، دمپر ورودی دمنده را تا انتها می بندیم. با باز کردن تدریجی دمپر، سرعت هوا را در خروجی محفظه با استفاده از سرعت سنج پروانه ای اندازه می گیریم. افت فشار ناشی از تغییر سرعت هوا را نیز بوسیله فشار سنج قرائت می کنیم.

نمودار مقادیر افت فشار بر حسب سرعت را رسم می نماییم. طبق رابطه برنولی، افت فشار با مجذور سرعت رابطه مستقیم دارد:

$$\Delta P = K \cdot U^2 \quad (1-4)$$

ΔP افت فشار صفحه توزیع کننده (Pa) و U سرعت سیال (m/s) می باشد. با استفاده از منحنی میانمایی حاصل از داده های اندازه گیری شده، می توان ضریب K را تعیین کرد.

بدین ترتیب برای بدست آوردن افت فشار بستر مواد، افت فشار بدست آمده از رابطه بالا را از افت فشار کل قرائت شده توسط فشار سنج کم می کنیم.



شکل ۴-۱ منحنی افت فشار صفحه توزیع کننده

۴-۱-۲ منحنی سیال سازی

۴-۱-۲-۱ بررسی تاثیر عمق بستر مواد در منحنی سیال سازی

یکی از مشخصه های مهم سیال سازی، نقطه حداقل سیال سازی است. حداکثر افت فشار، در این نقطه رخ می دهد. بنابراین بدست آوردن این نقطه برای ماده مورد آزمایش در عمق بسترهای مختلف ضروری می باشد. به منظور ترسیم منحنی سیال سازی به روش زیر عمل می کنیم. ابتدا دریچه ورودی دمیده را بطور کامل می بندیم. با باز کردن تدریجی دریچه، سرعت هوا افزایش می یابد. در نتیجه افت فشار افزایش یافته و بستر مواد بتدریج سست می شود، تا این که در یک نقطه به حداکثر خود می رسد. در این نقطه حبابهای ریز هوا در سطح بستر شروع به ظاهر شدن می کنند. به این نقطه، شرایط حداقل سیال سازی گفته می شود. این آزمایش برای ارتفاع بسترهای ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷ و ۰/۰۸ m انجام شد و سرعت هوای ورودی و افت فشار ناشی از بستر مواد در یک دوره معین به عنوان سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن ثبت گردید. این آزمایش با دمای هوای ورودی ۲۱ °C (محیط آزمایشگاه) و رطوبت اولیه شلتوک ۲۳/۳۳٪ بر پایه خشک انجام گردید.

۴-۲-۱-۲ بررسی تاثیر دمای هوای ورودی بر منحنی سیال سازی

دمای هوای ورودی به محفظه خشک کن می تواند بر منحنی سیال سازی تاثیر گذار باشد. به منظور بررسی این اثر آزمایش بخش قبل برای دمای هوای ۵۰ و ۸۰ °C در ارتفاع بستر های ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷ و ۰/۰۸ m تکرار شد.

۴-۲-۱-۳ بررسی تاثیر رطوبت اولیه مواد بر منحنی سیال سازی

همانگونه که قبلاً ذکر شد، رطوبت اولیه ماده می تواند شرایط حداقل سیال سازی را تغییر دهد. بنابراین به منظور بررسی تاثیر رطوبت بر سرعت وافت فشار حداقل سیال سازی آزمایش بخش ۴-۲-۱-۱ برای رطوبت های اولیه شلتوک در سه سطح رطوبت ۳۳/۶۴٪، ۳۶/۱۳٪ و ۳۸/۲۲٪ بر پایه خشک در ارتفاع بستر های ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ m و دمای هوای ۲۱ °C تکرار شد و منحنی های سیال سازی مربوط به آن رسم گردید.

۴-۱-۳ سینتیک خشک کردن

به منظور بررسی سینتیک خشک کردن شلتوک، شرایط بستر ثابت و بستر سیال بوجود آمد و با هم مقایسه گردید. بدین منظور دو فاکتور سرعت و دما که در هر دو شرایط حائز اهمیت هستند، مورد بررسی قرار گرفت. دلیل انتخاب این دو عامل را بدینگونه می توان شرح داد:

۱- سرعت هوای ورودی نقش تعیین کننده ای در ایجاد شرایط بستر ثابت یا سیال دارد. بنابراین برای انجام این مقایسه حتماً باید تاثیر سرعت سیال را مورد بررسی قرار داد.

۲- عامل موثر در خشک کن ها دمای سیال خشک کننده می باشد، بویژه در خشک کن های بسترسیال که به علت انتقال سریع جرم و حرارت قابلیت اعمال دماهای بالاتر را نیز دارند. با توجه به موارد ذکر شده می توان سایر عوامل مانند عمق بستر مواد و مساحت مقطع بستر را ثابت فرض کرد. البته در بخش ۴-۱-۳-۱ تاثیر عمق بستر در سینتیک خشک کردن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

برای ایجاد شرایط بستر ثابت، سرعت جریان هوا $0/8 \text{ m/s}$ انتخاب شد. سرعت هوا در شرایط حداقل سیال سازی نیز $1/85 \text{ m/s}$ بدست آمد (بخش ۳-۱). به این ترتیب آزمایش مربوط به سینتیک خشک کردن در سه سطح سرعت هوای $0/8$ ، $1/85$ و $2/7 \text{ m/s}$ انجام شد.

همانگونه که گفته شد فاکتور دما تاثیر قابل ملاحظه ای بر سینتیک خشک کردن دارد. در منابع موجود دمای مشخصی برای خشک کردن شلتوک در شرایط بستر سیال توصیه نشده است. ولی دماهای در محدوده 40°C - 170°C [۲۶] بکار گرفته شده اند. با توجه به این شرایط سه سطح دمای 40°C ، 60°C و 80°C استفاده شد.

یک روش مشخص برای تنظیم دستگاه و انجام آزمایش انتخاب و در تمام مراحل بکار گرفته شد. با توجه به حجم محفظه و جرم حجمی توده شلتوک ($487/9 \text{ kg/m}^3$) و ارتفاع بستر $0/08 \text{ m}$ وزن متوسط اولیه شلتوک استفاده شده $1/23 \text{ kg}$ محاسبه شد. شلتوک ها بوسیله یک کیف بزرگ به داخل محفظه هدایت شد تا شرایط یکسانی در حالت های مختلف حاکم باشد. مراحل انجام آزمایش به شرح زیر می باشد:

- ۱- ابتدا طبق روش گفته شده شلتوک ها را تا ارتفاع مورد نظر درون محفظه می ریزیم. به منظور حصول شرایط مناسب، ابتدا از نمونه های غیر اصلی استفاده می کنیم.
- ۲- دریچه ورودی دمنده را بطور کامل می بندیم. سپس با باز کردن تدریجی دریچه سرعت هوای گذرنده از بستر مواد را برابر مقدار مورد نظر تنظیم می کنیم.
- ۳- المنت های کوره را روشن کرده و با تنظیم ورودی جریان المنتها توسط دایمر دمای مورد نظر را ایجاد می کنیم. 40 تا 45 دقیقه دستگاه را روشن می گذاریم تا به شرایط تعادل حرارتی برسد.
- ۴- با استفاده از روشهای بالا دستگاه را بر روی سرعت های $0/8$ ، $1/85$ و $2/7 \text{ m/s}$ و دماهای 40°C ، 60°C و 80°C تنظیم می کنیم.

۵- پس از اطمینان از پایداری شرایط تنظیم شده، نمونه های اصلی را تا ارتفاع مورد نظر وارد محفظه کرده و وزن اولیه آنها را ثبت می کنیم. برای این منظور ترازوی CAS مدل SC-05P ساخت کشور آلمان با ظرفیت ۵ kg با دقت ۰/۵ gr مورد استفاده قرار گرفت (پیوست ۴).

۶- طی فرآیند خشک کردن در شرایط مختلف و در فواصل زمانی ثابت ۲ دقیقه ای محفظه را وزن کرده و آن را ثبت می کنیم.

۷- در پایان هر مرحله از آزمایش، پس از رسیدن به رطوبت معینی از هر یک از کف و سطح بستر سه نمونه ۱۰۰ گرمی جدا کرده و رطوبت آنها را به دقت تعیین می کنیم.

۱-۳-۱-۴ تاثیر ارتفاع بستر در سینتیک خشک کردن

برای بررسی تاثیر ارتفاع بستر مواد در فرآیند خشک کردن بستر سیال، آزمایش بخش قبل در ارتفاع بسترهای ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶ و ۰/۰۷ m برای سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s و دمای هوای ۶۰ °C و رطوبت اولیه ۳۸/۲۵٪ تکرار و منحنی های مربوط به آن رسم شد.

۲-۳-۱-۴ تاثیر رطوبت اولیه مواد در سینتیک خشک کردن

آزمایش بخش ۳-۱-۴ برای شلتوک با رطوبت اولیه ۳۵/۲۱٪، ۳۸/۲۵٪، ۳۹/۰۷٪، ۴۳/۳٪ و ۴۳/۹۲٪ در سرعت های ۰/۰۸ و ۱/۸۵ m/s و دمای ۶۰ °C و ارتفاع بستر ۰/۰۶ m تکرار شد. منحنی بدست آمده از انجام آزمایش تاثیر رطوبت اولیه مواد در سینتیک خشک کردن را نشان می دهد.

۲-۴ روش های تعیین کمیت های مربوطه

۱-۲-۴ تعیین خواص فیزیکی موثر دانه ها

بمنظور تعیین کرویت، قطر معادل، تخلخل، محتوای رطوبت و وزن مخصوص توده و ذره به روش زیر عمل می کنیم:

ابتدا از داخل کیسه های پلاستیکی موجود در انبار و از عمق های مختلف، ۱۰ نمونه ۵ کیلوگرمی جدا کرده و در کیسه های پلاستیکی مجزا قرار داده و سپس به طور تصادفی ۳ نمونه ۰/۵ کیلوگرمی از نمونه های مذکور انتخاب می کنیم.

پس از آن از هر نمونه ۰/۵ کیلو گرمی ۲۰۰ عدد دانه جدا نموده و با هم مخلوط می کنیم. از ۶۰۰ دانه بدست آمده ۱۰۰ عدد دانه را بطور تصادفی جدا کرده و اقطار بزرگ و متوسط آن را بوسیله کولیس با دقت 2×10^{-5} m اندازه گیری می کنیم. به این ترتیب با توجه به بخش ۲-۵-۱-۲ می توان کرویت دانه ها را بدست آورد. قطر متوسط دانه ها و کرویت آنها در پیوست ۵ ارائه شده است.

از جرم حجمی توده ذرات در معادلات مربوط به افت فشار استفاده می شود. برای اندازه گیری جرم حجمی توده ذرات، ابتدا ظرف استوانه ای کوچکی به عمق 0.06 m و قطر داخلی 0.04 m انتخاب گردید. سپس مقداری از شلتوک های انتخاب شده به روش مذکور را در ظرف می ریزیم به گونه ای که هیچ فشاری به دانه های داخل ظرف وارد نشود. سپس دانه های اضافی که از لبه ظرف بالاتر هستند را به کمک یک خط کش حذف می کنیم. با توجه به وزن خالص دانه ها و حجم ظرف می توان جرم حجمی توده ذرات را محاسبه کرد. برای بدست آوردن جرم حجمی ذره نیز می توان از روش جا به جایی مایع استفاده کرد. بدین ترتیب که یک دانه از نمونه مذکور را درون استوانه مدرجی که دارای ظرفیت ۱۰ میلی لیتر مایع تولوئن باشد می ریزیم، حجم مایع جابه جا شده بیان کننده حجم دانه می باشد. سپس با توجه به وزن نمونه، جرم حجمی ذره محاسبه می شود. برای کاهش خطای آزمایش، اندازه گیری ۵ بار تکرار گردید و میانگین آنها به عنوان جرم حجمی توده^۱ (ρ_B) و ذره^۲ (ρ_p) گزارش شد. به علت حجم بسیار کم دانه شلتوک و نامحسوس بودن جابجایی مایع، حجم ۱۰ عدد دانه شلتوک با این روش اندازه گیری شد. تفاوت

¹ Bulk Density

² Particle Density

در وزن استوانه پر شده، به علت تغییر در نحوه قرار گیری دانه ها بر روی همدیگر است که سبب تفاوت در جرم حجمی و تخلخل دانه ها می شود. بدین ترتیب با استفاده از معادله (۴-۱) می توان تخلخل بستر را تعیین کرد:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_p} \quad (۲-۴)$$

با افزایش سرعت هوای گذرنده از بستر مواد، ارتفاع بستر افزایش می یابد که با در نظر گرفتن ارتفاع بستر در این حالت و به کمک رابطه (۲-۲۳) می توان تخلخل دینامیک بستر ε_{dy} را محاسبه کرد. جرم حجمی و تخلخل بدست آمده برای شلتوک، در پیوست ۵ ارائه شده است.

۲-۲-۴ تعیین میزان رطوبت دانه ها

به منظور تعیین رطوبت دانه ها از استاندارد مهندسی کشاورزی امریکا (ASAE) استفاده شد [۳۰]. برای بدست آوردن درصد واقعی رطوبت دانه های شلتوک، ابتدا به طور تصادفی ۵ نمونه از نقاط مختلف توده ۱۰۰ کیلو گرمی مذکور جدا و درون اجاق قرار داده شد. میزان مورد نیاز دما و زمان لازم برای تعیین رطوبت نمونه ها در پیوست ۶ آورده شده است. برای انجام این کار ابتدا ظرفی که برای این کار در نظر گرفته شده است را به مدت ۳۰ دقیقه در داخل اجاق در دمای مربوطه گذاشته، سپس ظرف را وزن کرده و ترازو را صفر می کنیم. نمونه های شلتوک را درون ظرف ریخته و وزن اولیه آن را یادداشت می نماییم. پس از اتمام دوره خشک کردن، نمونه ها را از اجاق بیرون آورده و بلافاصله آن را وزن می کنیم. محتوای رطوبت بر پایه خشک از رابطه زیر بدست می آید:

$$X_{db} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \quad (۳-۴)$$

X_{db} محتوای رطوبت بر پایه خشک (%)، m_1 جرم اولیه محصول (Kg) و m_2 جرم نهایی محصول پس از خشک کردن (Kg) می باشد. در این آزمایش از ترازوی METTLER مدل AE 200 با

دقت 10^{-4} gr و ترازوی SARTORIUS مدل PT 210 با دقت 10^{-2} gr ساخت کشور آلمان استفاده شد. در این آزمایش اجاق F.A.G ساخت ایران بکار گرفته شد (پیوست ۴).

۴-۲-۳ آماده کردن شلتوک با رطوبت های مختلف

همانگونه که قبلاً ذکر شد رطوبت طبیعی شلتوک ۲۰-۳۰٪ می باشد. از این شلتوک برای انجام آزمایشات مربوط به منحنی های سینتیک خشک کردن استفاده شد. برای تهیه شلتوک با رطوبت نسبتاً بالا، ابتدا شلتوک را به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار داده سپس آن را از آب خارج کرده و به مدت ۴۸ ساعت در هوای آزاد قرار می دهیم تا رطوبت آن به مرور کم شود. برای تهیه شلتوک با رطوبتهای مختلف، در فواصل ۱۲ ساعت اقدام به نمونه برداری از آنها می نماییم. برای آن که دانه هایی با رطوبت یکسان حاصل شود، نمونه ها را در کیسه های پلاستیکی قرار داده و درب آنها را محکم می بندیم. سپس آنها را به مدت ۴۸ ساعت در دمای 5°C نگهداری می کنیم. با استفاده از این روش نمونه هایی با محتوای رطوبت ۲۲/۳۳٪، ۳۳/۶۴٪، ۳۵/۲۱٪، ۳۶/۱۳٪، ۳۸/۲۲٪، ۳۸/۲۵٪، ۳۹/۰۷٪، ۴۳/۳٪ و ۴۳/۹۲٪ آماده شد.

۴-۲-۴ تعیین ویژگی های هوای خروجی دمنده

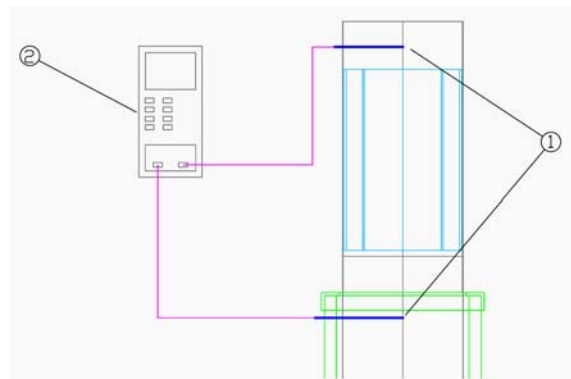
آزمایشات مربوط به خشک کردن در شرایط هوایی با دمای $21 \pm 1^{\circ}\text{C}$ و رطوبت نسبی ۳۵٪ در آزمایشگاه پژوهشکده کشاورزی مرکز تحقیقات عصر انقلاب انجام شد. بنابراین با استفاده از جدول سایکومتریک (پیوست ۷) می توان نسبت رطوبت و دیگر خصوصیات ترمودینامیکی هوای گرم ورودی به محفظه را بدست آورد. بدین منظور سنسورهای دما و رطوبت را در ورودی محفظه خشک کن نصب کرده و دما و رطوبت نسبی را قرائت می کنیم. این کار را در حالتی که محفظه خشک کن خالی از مواد است انجام می دهیم. سپس با روشن کردن المنت های کوره، دماهای مورد آزمایش (۴۰، ۶۰ و 80°C) را ایجاد کرده و با استفاده از رطوبت سنج دیجیتالی رطوبت نسبی هوا را برای دماهای مختلف قرائت می کنیم.

۳-۴ ابزار اندازه گیری پارامترهای موثر بر سیال سازی

۴-۳-۱ دما

برای اندازه گیری دما از دماسنج دیجیتالی FLUKE ساخت کشور آمریکا با دقت 0.1°C استفاده شد (پیوست ۴). در انجام آزمایشات مربوط به سینتیک خشک کردن و سیال سازی بستر مواد می بایست دمای هوای ورودی به دمنده (هوای محیط) و دمای هوای ورودی و خروجی محفظه خشک کن را اندازه گیری نمود.

برای کنترل دمای هوای ورودی به محفظه خشک کن از یک دیمر استفاده شد. بدین ترتیب که با تنظیم ولتاژ ورودی المنتهای کوره، دمای مورد نیاز هوای ورودی به محفظه خشک کن در مقادیر مربوطه تثبیت گردید. دلیل استفاده از دیمر بجای ترموستات این است که با بکارگیری ترموستات، در هنگام قطع المنت مقداری پسماند حرارتی ایجاد می شود که اگر پس ماند مذکور زیاد باشد دقت آزمایش را کاهش می دهد. از آنجائی که کاهش ولتاژ المنتها سبب کاهش توان حرارتی آنها می شود، پسماند حرارتی نیز کاهش می یابد. سنسور مربوط به اندازه گیری دمای هوای خروجی محفظه خشک کن از نوع میله ای بوده که در بالا و پایین محفظه خشک کن نصب شد. نمای کلی نحوه کاربرد دماسنج دیجیتالی و محل نصب سنسورهای آن در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.

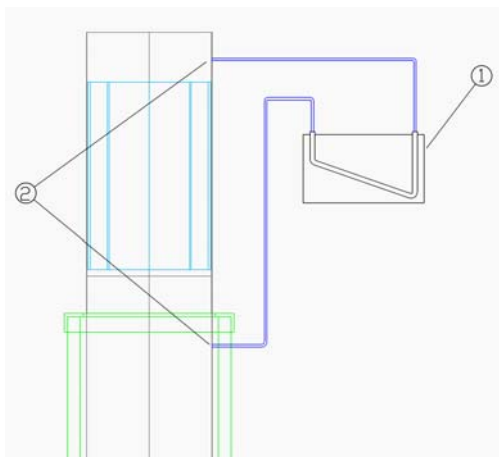


۱- سنسورهای میله ای
۲- دماسنج دیجیتال

شکل ۴-۲ نمای کلی نحوه کاربرد دماسنج دیجیتالی و محل نصب سنسورهای آن

۴-۳-۲ فشار

به منظور اندازه گیری افت فشار ناشی از بستر مواد همچنین افت فشار صفحه توزیع کننده از یک مانومتر AIRFLOW مدل AFL400 محصول کشور آلمان با دقت 0.2 Inch W.G (5 pa) استفاده شد. مشخصات مانومتر در پیوست ۴ آورده شده است. برای اندازه گیری افت فشار، یک سر یکی از لوله های لاستیکی را در زیر محفظه خشک کن نصب می کنیم بطوریکه مماس با بدنه داخلی محفظه یکنواخت سازی جریان هوا باشد. برای اندازه گیری افت فشار حاصل از بستر مواد لوله دیگر را بالای محفظه خشک کن نصب می کنیم. با آزاد گذاشتن لوله دوم می توان افت فشار نسبت به اتمسفر را اندازه گیری کرد. نمای کلی نحوه کاربرد مانومتر و محل نصب لوله های آن در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

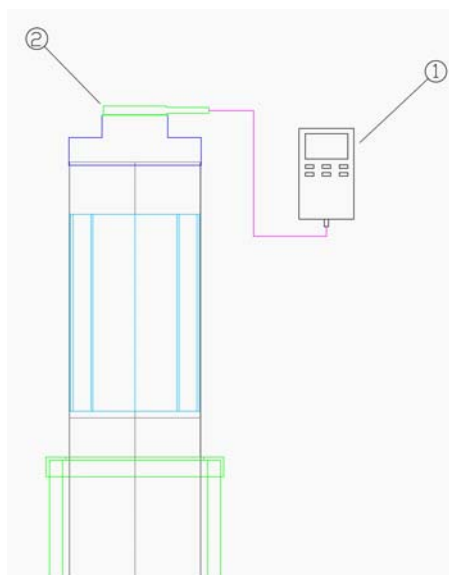


۱- مانومتر
۲- پیئت تیوب های مانومتر

شکل ۳-۴ نمای کلی نحوه کاربرد مانومتر و محل نصب لوله های آن

۴-۳-۳ سرعت

برای اندازه گیری سرعت هوای ورودی به محفظه خشک کن از یک سرعت سنج دیجیتالی پروانه ای Lutron مدل AM-4203 ساخت کشور تایوان با دقت 0.1 m/s استفاده شد (پیوست ۴). نمای کلی سرعت سنج و سنسور مربوط به آن در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



۱- سرعت سنج دیجیتالی

۲- پروپ پروانه ای

شکل ۴-۴ نمای کلی سرعت سنج و سنسور مربوط به آن

فصل پنجم

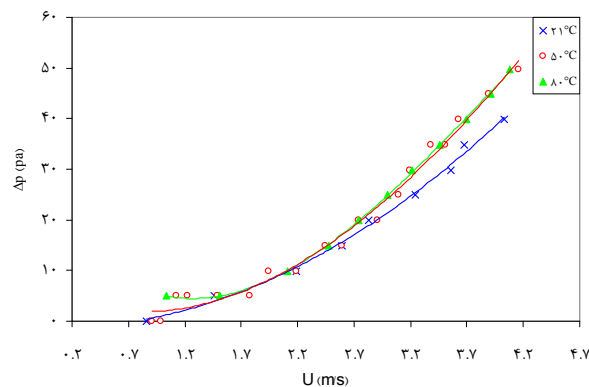
بحث و نتیجه گیری

در این فصل به بررسی داده های آزمایشگاهی خواهیم پرداخت. ابتدا نتایج بدست آمده از آزمایش های مربوط به فرآیند سیال سازی و سینتیک خشک کردن را ارائه نموده و سپس به تحلیل و بررسی آنها می پردازیم.

۱-۵ سیال سازی

۱-۱-۵ افت فشار صفحه توزیع کننده

همانگونه که ذکر شد، بمنظور تعیین افت فشار صفحه توزیع کننده آزمایش بخش ۱-۱-۴ با هوای ورودی در سه سطح دمایی ۲۱ (دمای آزمایشگاه)، ۵۰ و ۸۰ °C انجام شد. به این ترتیب که با عبور هوا از صفحه توزیع کننده، منحنی افت فشار برحسب سرعت را حاصل می شود. نتایج بدست آمده از این آزمایش در شکل ۱-۵ آورده شده است.



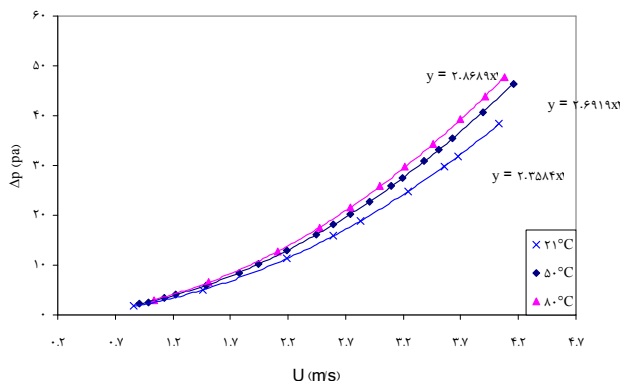
شکل ۱-۵ منحنی افت فشار توزیع کننده در دماهای مختلف

همانگونه که گفته شد افت فشار با مجذور سرعت رابطه مستقیم دارد که با تعیین ضریب مناسب می توان نشان داد:

$$\Delta P = K \cdot U^2 \quad (1-5)$$

با توجه به داده های بدست آمده می توان افت فشار ناشی از صفحه توزیع کننده را به شکل رابطه ۱-۵ تقریب زد. ضرایب K برای دماهای مختلف تعیین و در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دما، ضریب K و در نتیجه افت فشار صفحه توزیع کننده افزایش می یابد.



شکل ۵-۲ منحنی های حاصل از رگرسیون داده های آزمایشگاهی افت فشار توزیع کننده

میزان خطای منحنی های بالا از نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۵-۱ آورده شده است. همچنین خطای اندازه گیری تجهیزات سنجش افت فشار و سرعت هوا به ترتیب $\pm 0.10\%$ و $\pm 0.06\%$ می باشد.

جدول ۵-۱ مقادیر K بدست آمده از رگرسیون افت فشار توزیع کننده

هوای ورودی	دمای	رابطه	اختلاف از داده های حاصل از آزمایش
	$T=21\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta P = 2.36U^2$	$4/85\%$
	$T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta P = 2.69U^2$	16%
	$T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta P = 2.87U^2$	$12/54\%$

خلاصه روابطی که برای بیان افت فشار صفحه توزیع کننده بیان شده اند در جدول ۵-۲ آورده شده است.

همانگونه که در جدول ۵-۲ نشان داده شد ΔP_h در رابطه Brauer و Mewes تابعی از افت فشار بستر مواد و در نتیجه ارتفاع بستر می باشد. بنابراین همانگونه که در جدول ۵-۳ نشان داده شده است، با افزایش ارتفاع بستر افت فشار نیز افزایش می یابد. حال آنکه افت فشار بدست آمده از

آزمایش مستقل از ارتفاع بستر می باشد و تابعی از سرعت حداقل سیال سازی است که مقدار آن تقریباً ثابت می باشد. مقایسه مقادیر افت فشار بدست آمده از رابطه Brauer و Mewes و مقادیر حاصل از آزمایش در جدول ۵-۳ آورده شده است.

جدول ۵-۲ روابط تئوری موجود برای افت فشار توزیع کننده

رابطه	
Mewes و Brauer	$\Delta P_d = 0.3 \cdot \Delta P_b$ در U_{mf} :
Harrison و Davidson	$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_b} = 0.15$ $1 < \frac{U_p}{U_{mf}}$
کریزی و کورشی	$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_b} = 0.01 + 0.2 \left[1 - \exp\left(-0.5 \frac{D_o}{L}\right) \right]$
تئوری منفذ	$\Delta p_d = 1.04 \left(\frac{d_o}{b}\right)^{0.25} \cdot \frac{U_{go}^2 \rho_{go}}{2}$

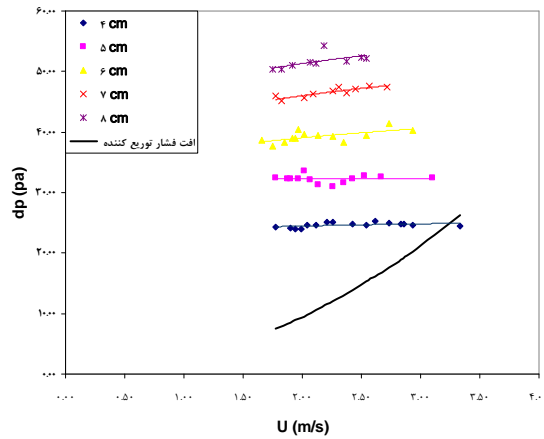
جدول ۵-۳ مقایسه مقادیر بدست آمده از رابطه Brauer و Mewes و مقادیر حاصل از آزمایش در دمای ۲۱°C

ارتفاع بستر	شرایط حداقل سیال سازی	افت فشار توزیع کننده (pa) Mewes و Brauer	اختلاف از داده ای حاصل از آزمایش
۴ cm	۷/۴۵	۴۸/۵۳	۵۵٪
۵ cm	۷/۴۵	۶۴/۹۵	۷۷٪
۶ cm	۶/۴۷	۷۷/۱۹	۱۰۹٪
۷ cm	۷/۴۵	۹۱/۸۳	۱۱۳٪
۸ cm	۷/۲۵	۱۰۰/۸۵	۱۲۹٪

منحنی زیر نشان دهنده افت فشار توزیع کننده در ارتفاع بسترهای مختلف بدست آمده از رابطه Harrison و Davidson می باشد. در این رابطه نیز افت فشار صفحه توزیع کننده تابعی از افت فشار بستر مواد می باشد.

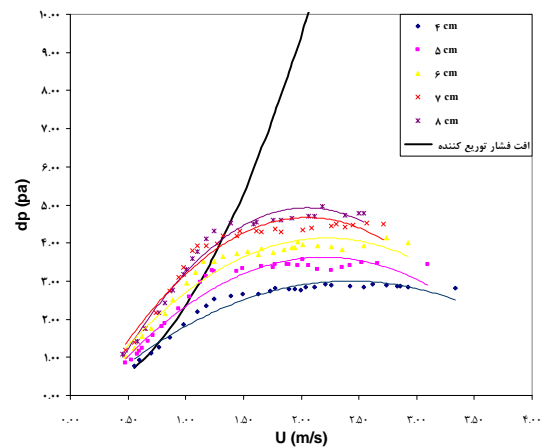
همانگونه که در شکل ۵-۳ نشان داده شده است افت فشار بدست آمده از رابطه Harrison و Davidson تابعی از ارتفاع بستر می باشد و با افزایش عمق مواد، افزایش می یابد. همچنین در

بازه ای که این رابطه صدق می کند افت فشار تقریباً ثابت می باشد که این با نتایج حاصل از آزمایش در تناقض می باشد، زیرا افت فشار توزیع کننده تابعی از سرعت است که با افزایش آن، افزایش می یابد.



شکل ۳-۵ منحنی های افت فشار توزیع کننده حاصل از رابطه Davidson و Harrison

شکل ۴-۵ نشان دهنده افت فشار توزیع کننده در ارتفاع بستر های مختلف بدست آمده از رابطه کریزی و کورشی می باشد.



شکل ۴-۵ منحنی های افت فشار توزیع کننده بدست آمده از رابطه کریزی و کورشی

همانگونه که در شکل مشاهده می شود افت فشار حاصل از رابطه کریزی و کورشی نیز تابعی از افت فشار بستر مواد است که با افزایش ارتفاع بستر افزایش می یابد. می توان مشاهده کرد که در

شرایط بستر ثابت ($U < 1/2 \text{ m/s}$) نتایج حاصل از آزمایش تطابق بهتری با رابطه دارد. خطای نتایج بدست آمده در جدول ۴-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵ اختلاف مقادیر افت فشار توزیع کننده بدست آمده از رابطه کریزی و کورشی با داده های حاصل از

آزمایش	
ارتفاع بستر	اختلاف از داده ای حاصل از آزمایش
۴ cm	۱۴%
۵ cm	۲۴%
۶ cm	۴۱%
۷ cm	۶۱%
۸ cm	۵۶%

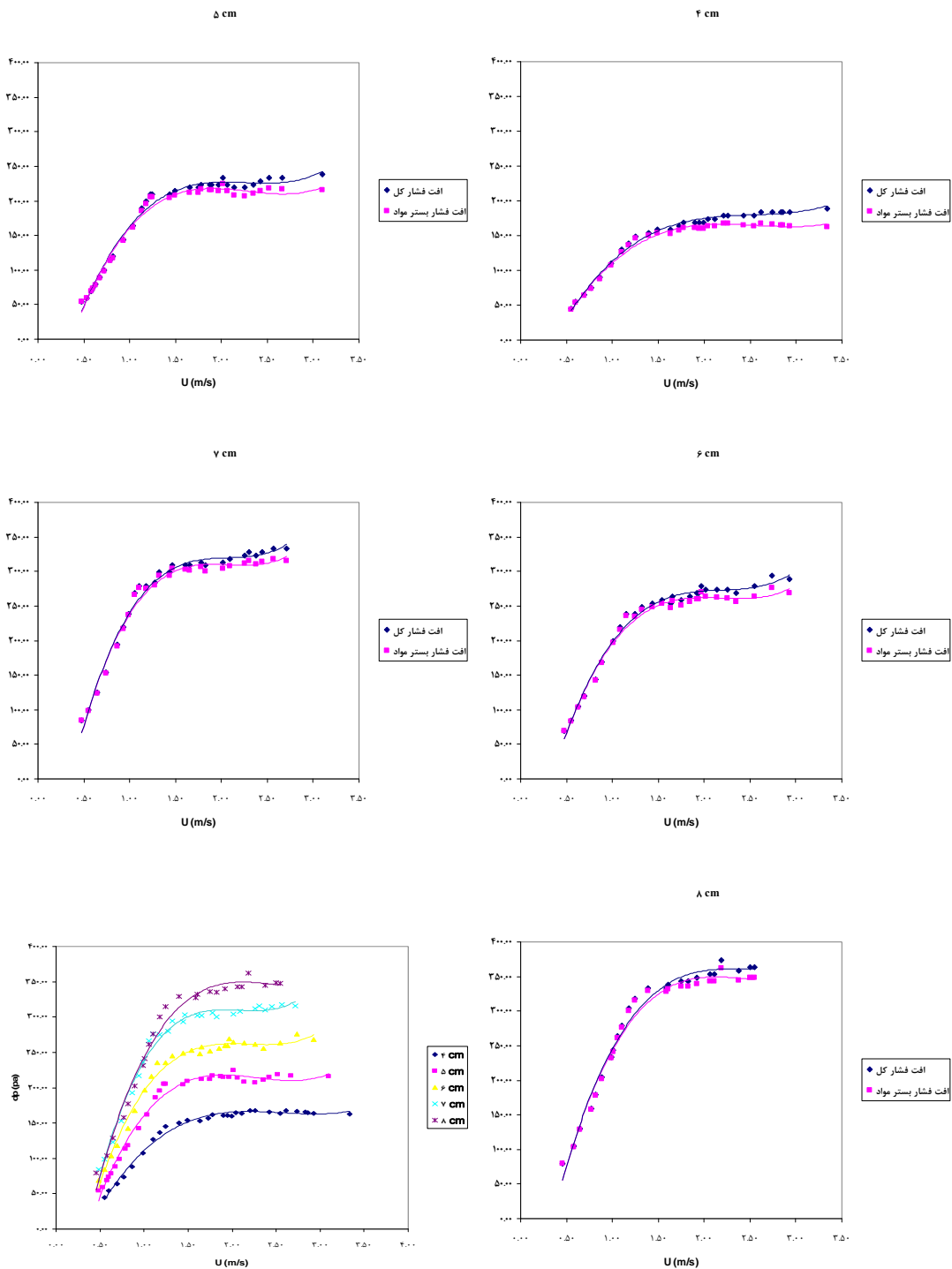
۵-۱-۲ افت فشار بستر مواد

۵-۱-۲-۱ تاثیر ارتفاع بستر در منحنی سیال سازی

با توجه به مطالب ذکر شده در بخش ۴-۱-۲-۱ آزمایشهای مربوط به تعیین منحنی های افت فشار بر حسب سرعت سیال در ارتفاع بستر های مختلف انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش در شکل ۵-۵ آورده شده است.

همانگونه که گفته شد افت فشار کل عبارت است از مجموع افت فشار ناشی از صفحه توزیع کننده و افت فشار بستر مواد. با کم کردن افت فشار صفحه توزیع کننده (که در بخش ۵-۱-۱ تعیین شد) از افت فشار کل، می توان منحنی افت فشار بستر مواد را رسم کرد.

چنانچه در شکل مشاهده می شود در ابتدا با افزایش سرعت سیال افت فشار نیز با شیب تندی و تقریبا به صورت خطی افزایش می یابد. در این مرحله بستر، از نوع بستر ثابت می باشد (پیوست ۸). با شروع سیال شدن بستر مواد شیب منحنی به تدریج کاهش می یابد بطوری که در نقطه مینیمم سیال سازی به صفر می رسد و با افزایش مجدد سرعت تقریبا به همین شکل ثابت می ماند. نقطه کمینه سیال سازی نقطه ای است که افت فشار بستر مواد به بیشترین مقدار خود می رسد.



شکل ۵-۵ افت فشار بستر مواد در ارتفاع بسترهای مختلف، دمای هوای ورودی 21°C (محیط آزمایشگاه) و رطوبت اولیه $23/33\%$ بر پایه خشک

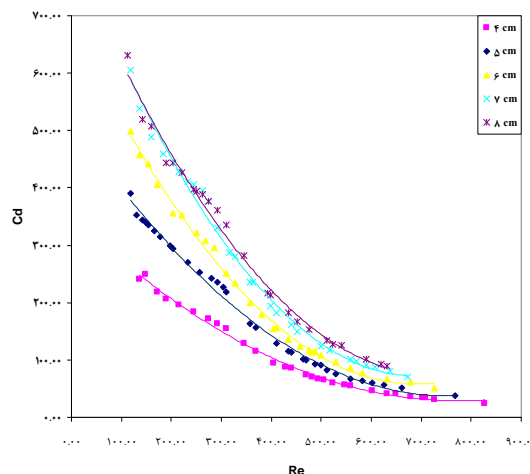
ضریب شکل دانه های شلتوک (نسبت بزرگترین قطر به کوچکترین قطر دانه) تقریباً برابر ۴/۸ و ضریب کرویت آنها ۰/۳۷۷ می باشد، بنابراین تقریباً می توان آنها را دانه سوزنی شکل در نظر گرفت. این نکته و همچنین شکل قرار گرفتن دانه ها در بستر که به صورت کاتوره ای می باشد، موجب کاهش یکنواختی بستر مواد و همچنین پراکندگی نتایج حاصل از آزمایش می گردد. چنانچه در ادامه اشاره خواهد شد شکل قرار گرفتن دانه در برابر جریان موجب تغییر ضریب درگ آن و در نتیجه تغییر افت فشار مربوطه خواهد شد، که این نکته می توان به توده دانه ها نیز تعمیم داد.

با استفاده از عدد رینولدز و ضریب درگ می توان منحنی های سیال سازی را بی بعد سازی کرد، بدین ترتیب که:

$$Re = \frac{\rho U_g d_p}{\eta} \quad (۲-۵)$$

$$C_D = \frac{2\Delta P}{\rho U_g^2} \quad (۳-۵)$$

شکل ۵-۶ منحنی های سیال سازی بی بعد در ارتفاع بسترهای مختلف را نشان می دهد.



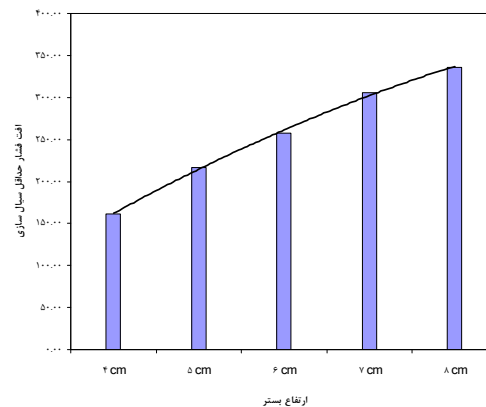
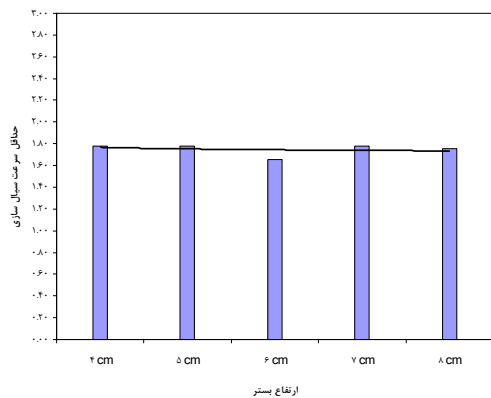
شکل ۵-۶ منحنی های بی بعد افت فشار بستر مواد در ارتفاع بسترهای مختلف

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش عدد رینولدز ضریب درگ کاهش می یابد. همچنین با افزایش ارتفاع بستر ضریب درگ نیز افزایش می یابد.

همانگونه که گفته شد با افزایش سرعت سیال از صفر، در یک بستر ثابت مواد، افت فشار به سرعت افزایش می یابد. با افزایش مجدد سرعت، بستر کم کم به لرزش در می آید، سپس حباب های هوا از یک نقطه از مقطع، بستر را می شکافد و خارج می گردد. این ستون ها که ناشی از حرکت حباب های هوا هستند به صورت تصادفی در نقاط مختلف بستر بوجود می آیند (پیوست ۹). همانگونه که گفته شد شکل قرار گرفتن دانه ها در مکان ایجاد این ستونها نقش بسزایی دارد. با افزایش سرعت سیال، میزان افزایش افت فشار کاهش می یابد تا اینکه در شرایط حداقل سیال سازی به حداکثر خود می رسد (پیوست ۱۰). پس از حداقل سیال سازی با افزایش سرعت سیال افت فشار بستر تا حدودی (با شیب مثبت کوچکی) به صورت ثابت ادامه می یابد. سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن، حاصل از انجام آزمایشات برای ارتفاع بستر های مختلف در جدول ۵-۵ و شکل ۷-۵ آورده شده است.

جدول ۵-۵ مقادیر سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن در ارتفاع بستر های مختلف

ارتفاع بستر	سرعت حداقل سیال سازی (m/s)	افت فشار حداقل سیال سازی (pa)
۴ cm	۱/۷۸	۱۶۱/۷۷
۵ cm	۱/۷۸	۲۱۶/۵۱
۶ cm	۱/۶۶	۲۵۷/۳۰
۷ cm	۱/۷۸	۳۰۶/۰۹
۸ cm	۱/۷۵	۳۳۶/۱۵



شکل ۵-۷ سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن در ارتفاع بستر های مختلف، با هوای ورودی 21°C و رطوبت اولیه ۲۳/۳۳٪ همانگونه که مشاهده می شود سرعت حداقل سیال سازی مستقل از ارتفاع بستر می باشد و تقریباً ثابت می ماند. همچنین با افزایش ارتفاع بستر افت فشار بستر مواد افزایش می یابد. خلاصه روابط ارائه شده برای تعیین سرعت سیال سازی در جدول ۵-۶ آورده شده است.

جدول ۵-۶ خلاصه روابط ارائه شده برای تعیین حداقل سرعت سیال سازی

Kunni و Levenspiel (۱۹۹۱)	$\frac{1.75}{\psi \cdot \epsilon_{mf}^3} \text{Re}^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\psi^2 \cdot \epsilon_{mf}^3} \text{Re} = \text{Ar}$
Vogel و Saxena (۱۹۷۷)	$U_{mf} = \frac{\eta}{\rho_g \cdot dp} \left[(25.28^2 + 0.0571 \text{Ar})^{1/2} - 25.28 \right]$
Todes و Acrov (۱۹۶۸)	$U_{mf} = \frac{\text{Ar} \cdot \eta \cdot \epsilon^{4.75}}{\rho_g \cdot dp (18 + 0.61 \sqrt{\text{Ar} \cdot \epsilon^{4.75}})}$
Yu و Wen (۱۹۶۶)	$U_{mf} = \rho_g \cdot dp \left[(33.7^2 + 0.0408 \text{Ar})^{1/2} - 33.7 \right]$
Goroshko و همکاران (۱۹۵۸)	$U_{mf} = \frac{\text{Ar} \cdot \eta}{\rho_g \cdot dp \left[\frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} + \left(\frac{1.75 \text{Ar}}{\epsilon_{mf}^3} \right)^{1/2} \right]}$

همانگونه که مشاهده می شود سرعت حداقل سیال سازی در تمامی روابط بالا مستقل از ارتفاع بستر و تابعی از ویژگی های ذرات و سیال می باشد. مقادیر بدست آمده از این روابط در جدول ۵-۷ ارائه شده است.

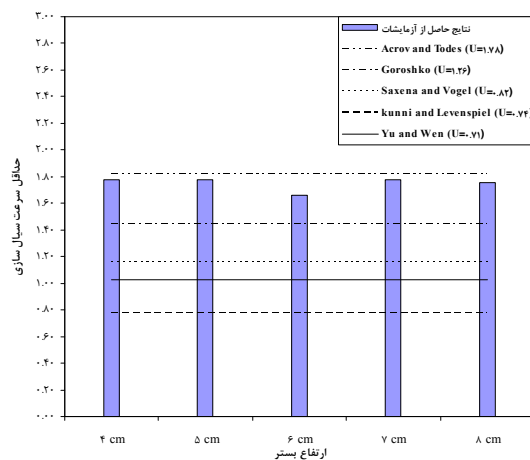
جدول ۵-۷ مقادیر سرعت حداقل سیال سازی بدست آمده از روابط موجود

اختلاف از داده های آزمایشی سرعت حداقل سیال سازی

	(m/s)	
Kunni و Levenspiel	۰/۷۸	%۵۶
Vogel و Saxena	۱/۱۶	%۳۵
Todes و Acrov	۱/۸۲	%۲
Yu و Wen	۱/۰۳	%۴۲
Goroshko و همکاران	۱/۴۴	%۱۹

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با مقادیر بدست آمده از روابط بالا در شکل ۵-۸ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود نتایج حاصل از آزمایش با مقادیر بدست آمده از رابطه Todes و Acrov تطابق خوبی (خطای ۰/۲٪) دارد.

برای تعیین افت فشار بستر مواد نیز روابط متعددی وجود دارد که خلاصه آنها در جدول ۵-۸ آورده شده است. این روابط برای بیان افت فشار بستر ثابت پیشنهاد شده اند.

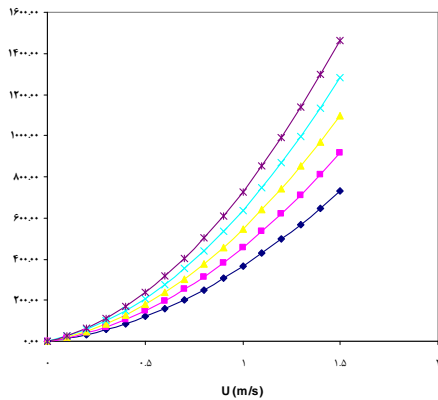


شکل ۵-۸ مقایسه سرعت حداقل سیال سازی بدست آمده از آزمایش و روابط تئوری

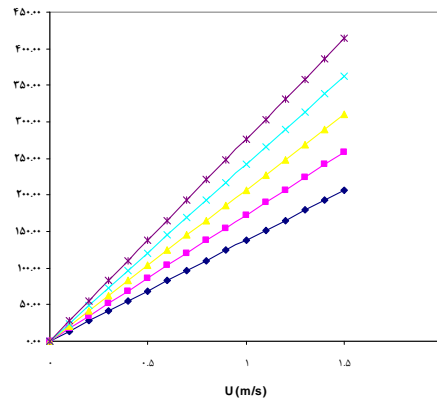
جدول ۵-۸ روابط موجود برای تعیین افت فشار بستر مواد

رابطه	
Ergun	$\frac{\Delta P_b}{L} = 150 \frac{\eta \cdot U \cdot (1 - \epsilon_{st})^2}{\epsilon_{st}^3 \cdot (\psi \cdot dp)^2} + 1.75 \frac{\rho_g \cdot U^2 \cdot (1 - \epsilon_{st})}{\epsilon_{st}^3 \cdot \psi \cdot dp}$
Kozeny و Carmen	$\Delta P_b = 180 \frac{U \cdot L \cdot \eta (1 - \epsilon_{st})^2}{\epsilon_{st}^3 (dp \cdot \psi)^2}$

منحنی های افت فشار بدست آمده از روابط بالا برای ارتفاع بستر های مختلف در شکل ۵-۹ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش ارتفاع افت فشار بستر مواد افزایش می یابد.



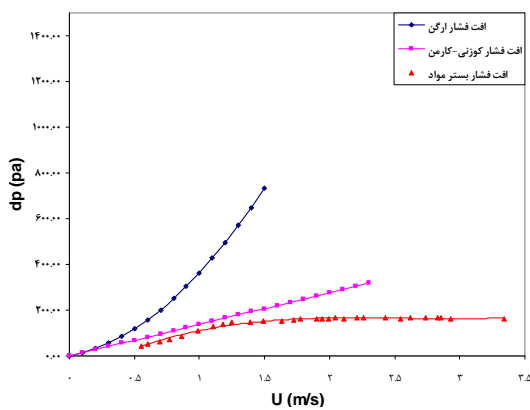
(a)



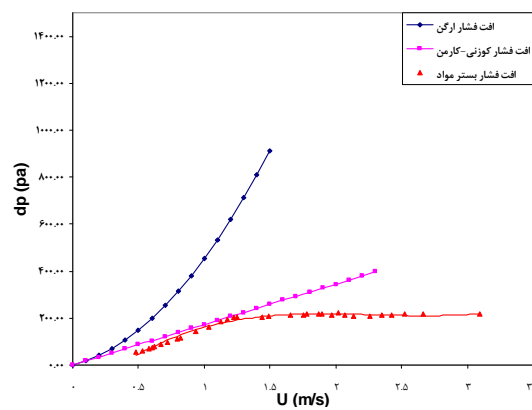
(b)

شکل ۵-۹ منحنی های افت فشار بدست آمده از (a) رابطه Ergun (b) رابطه Kozeny و Carmen، در ارتفاع بستر های مختلف و دمای هوای 21°C

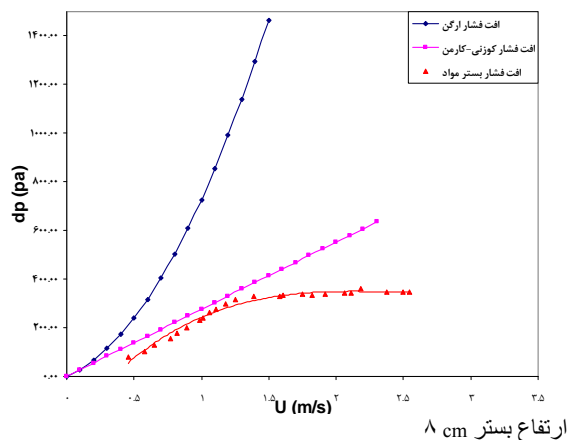
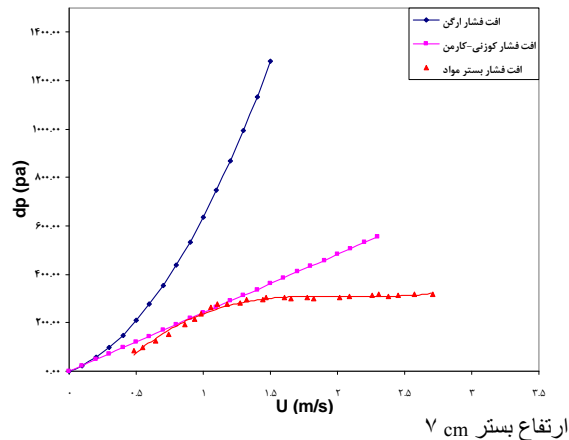
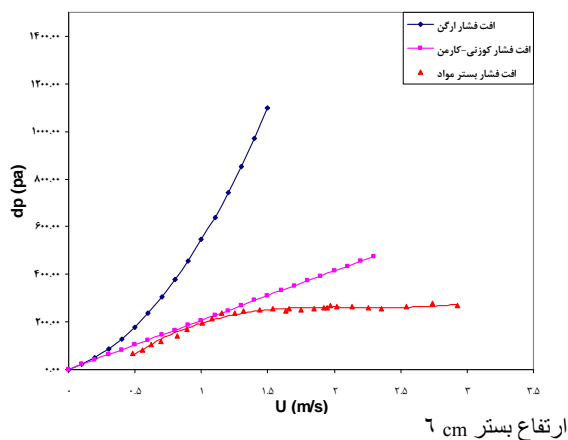
شکل ۵-۱۰ مقایسه منحنی های افت فشار بدست آمده از آزمایش با مقادیر محاسبه شده از روابط در ارتفاع بستر های مختلف را نشان می دهد.



ارتفاع بستر ۴ cm



ارتفاع بستر ۵ cm



خطای اندازه گیری	خطای رابطه کوزنی-کارمن	ارتفاع بستر
$\pm 3/35\%$	38%	4 cm
$\pm 2/85\%$	24%	5 cm
$\pm 2/54\%$	18%	6 cm
$\pm 2/37\%$	13%	7 cm
$\pm 2/31\%$	27%	8 cm

شکل ۵-۱۰ مقایسه منحنی های افت فشار بستر مواد حاصل از روابط موجود و داده های حاصل از آزمایش در ارتفاع بستر های مختلف، با هوای ورودی 21°C همانگونه که در شکل مشاهده می شود منحنی های افت فشار بستر مواد در محدوده بستر ثابت تطابق خوبی با افت فشار بدست آمده از رابطه Kozeny-Carmen دارد. زیرا همانگونه که قبلا گفته شد در محدوده بستر ثابت تغییرات افت فشار بر حسب سرعت، مانند رابطه کوزنی-کارمن خطی می باشد.

۵-۲-۲-۱-۲ تاثیر دمای هوای ورودی بر منحنی سیال سازی

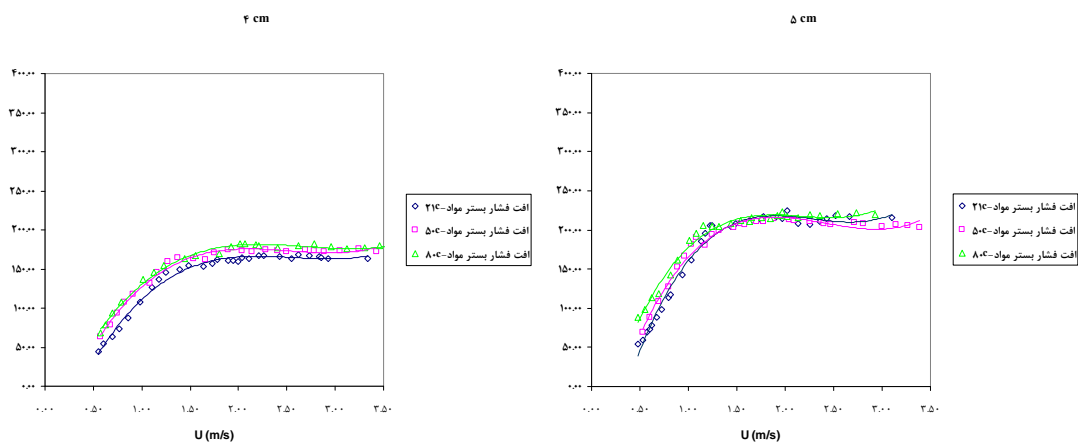
برای بررسی تاثیر دما بر منحنی سیال سازی آزمایشات مربوطه در دماهای مختلف انجام گرفت و با مقادیر بدست آمده از روابط پیشنهاد شده مقایسه شد. منحنی های حاصل از آزمایشات برای دماهای ۲۱، ۵۰ و 80°C در شکل ۵-۱۱ آورده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می

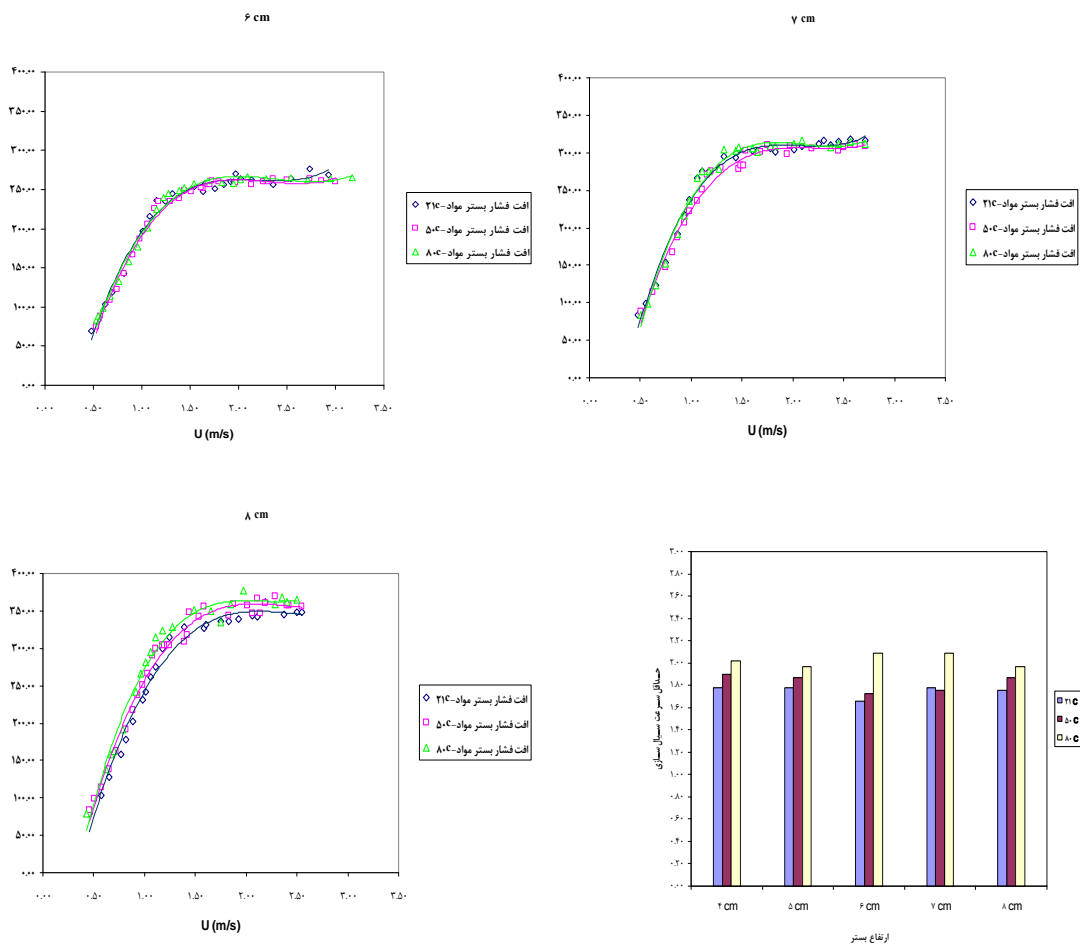
شود با افزایش دمای هوا، سرعت حداقل سیال سازی و در نتیجه افت فشار مربوط به آن افزایش می یابد.

جدول ۹-۵ و شکل ۱۲-۵ نشان دهنده مقادیر سرعت حداقل سیال سازی بدست آمده از روابط در دماهای مختلف می باشد.

جدول ۹-۵ مقادیر سرعت حداقل سیال سازی بدست آمده از روابط موجود در دماهای مختلف

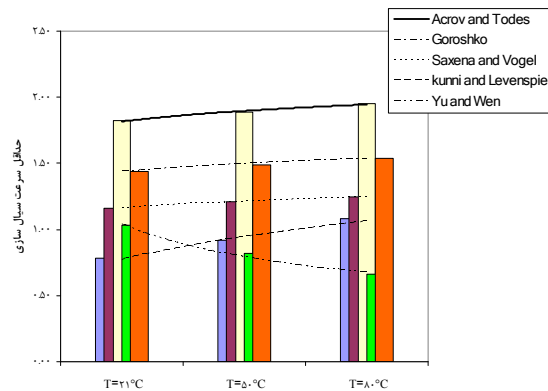
	سرعت حداقل سیال سازی (m/s)		
	T=۲۱ °C	T=۵۰ °C	T=۸۰ °C
Kunni و Levenspiel	۰/۷۸	۰/۹۲	۱/۰۸
Vogel و Saxena	۱/۱۶	۱/۲۱	۱/۲۵
Todes و Acrov	۱/۸۲	۱/۸۹	۱/۹۵
Yu و Wen	۱/۰۳	۰/۸۲	۰/۶۶
Goroshko و همکاران	۱/۴۴	۱/۴۹	۱/۵۴





شکل ۵-۱۱ منحنی های افت فشار بستر مواد حاصل از آزمایش در دماهای مختلف

همانگونه که در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است با افزایش دما سرعت حداقل سیال سازی افزایش می یابد. تنها در رابطه ای که توسط Wen و Yu ارائه شد سرعت حداقل سیال سازی با افزایش دما کاهش می یابد.



شکل ۵-۱۲ مقایسه مقادیر سرعت حداقل سیال سازی بدست آمده از روابط موجود در دماهای مختلف

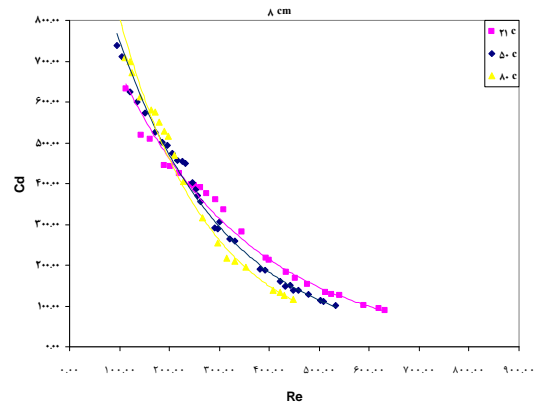
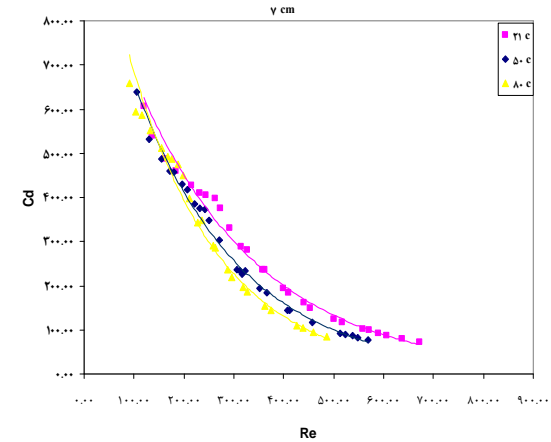
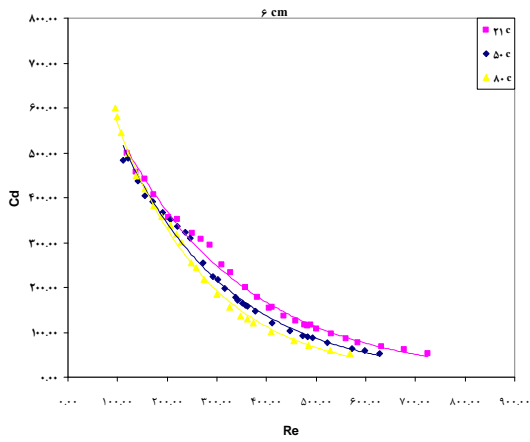
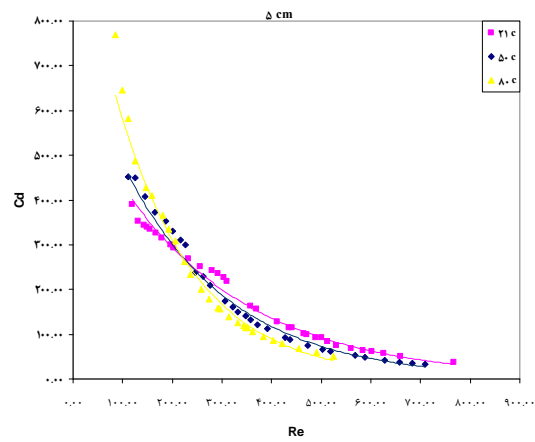
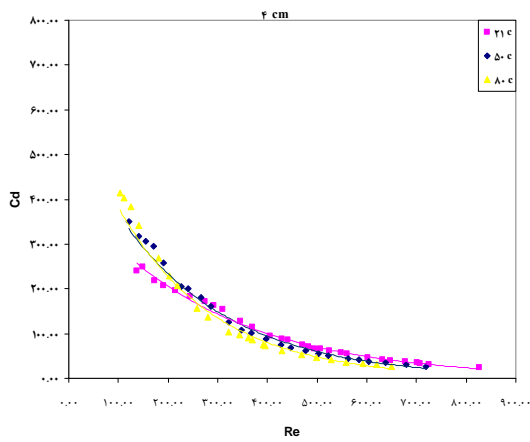
با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مقادیر بدست آمده از روابط ذکر شده در می یابیم که این نتایج تطابق خوبی با رابطه Acrov و Todes دارند. این مقایسه در جدول ۵-۱۰ ارائه شده است.

جدول ۵-۱۰ مقایسه مقادیر حداقل سرعت سیال سازی بدست آمده از رابطه Acrov و Todes با داده های حاصل از آزمایش در دماهای مختلف

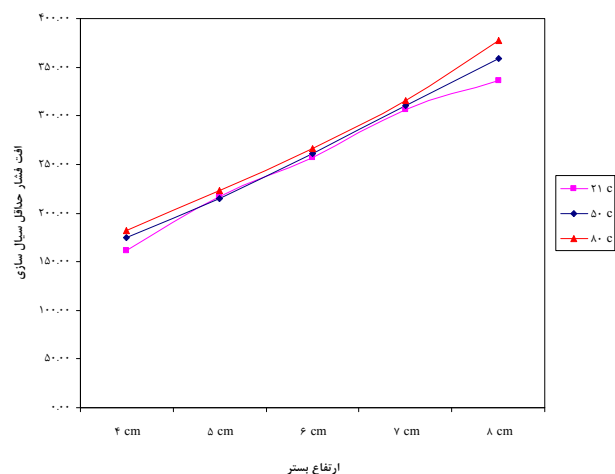
آزمایش	T=21 °C				T=50 °C				T=80 °C					
	Acrov	Todes	اختلاف	خطای گیری	آزمایش	Acrov	Todes	اختلاف	خطای گیری	آزمایش	Acrov	Todes	اختلاف	خطای گیری
	و	و	اندازه	اندازه	و	و	اندازه	اندازه	و	و	اندازه	اندازه	و	اندازه
۴ cm	۱/۷۸		%۲	±%۳/۳۵	۱/۹		%۰/۵	±%۳/۱۴	۲/۰۲		%۳		±%۲/۹۸	
۵ cm	۱/۷۸		%۲	±%۲/۸۵	۱/۸۷		%۱	±%۲/۸۳	۱/۹۷		%۱		±%۲/۸۶	
۶ cm	۱/۶۶	۱/۸۲	%۹	±%۲/۵۴	۱/۷۳	۱/۸۹	%۹	±%۲/۵۵	۲/۰۹	۱/۹۵	%۶		±%۲/۴۵	
۷ cm	۱/۷۸		%۲	±%۲/۳۷	۱/۷۵		%۸	±%۲/۴	۲/۰۹		%۶		±%۲/۳۷	
۸ cm	۱/۷۵		%۴	±%۲/۳۱	۱/۸۷		%۱	±%۲/۲۷	۱/۹۷		%۱		±%۲/۲۶	

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دما، اختلاف مقادیر بدست آمده از آزمایش و مقادیر حاصل از رابطه Acrov و Todes کمتر می شود.

شکل ۵-۱۳ منحنی های افت فشار بی بعد بستر مواد در دما ها و ارتفاع بستر های مختلف نشان می دهد.



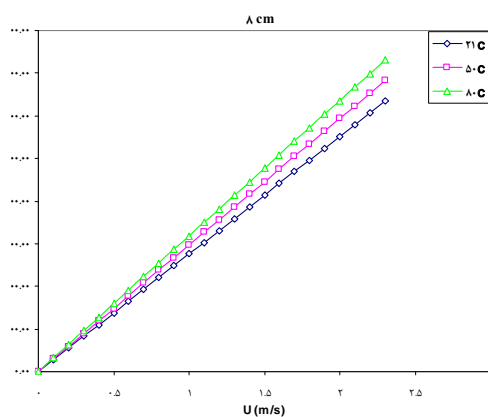
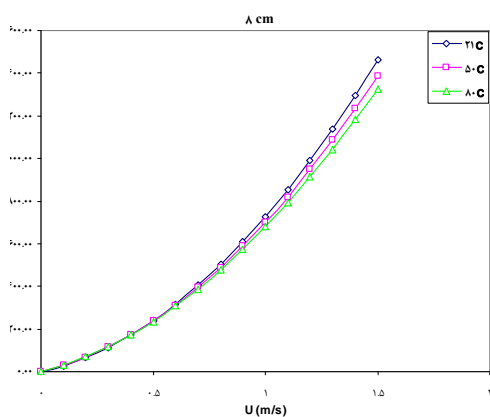
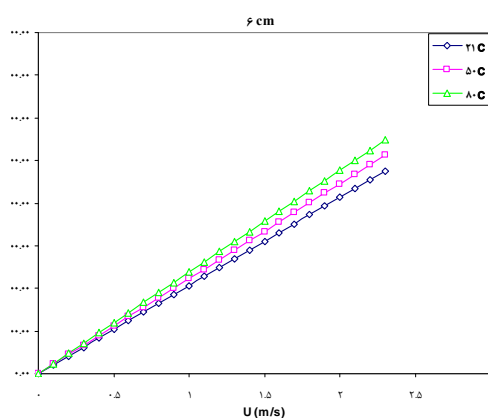
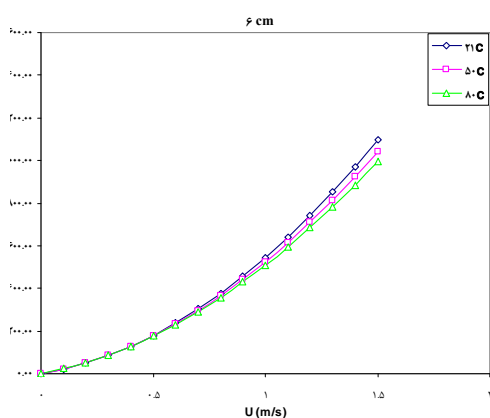
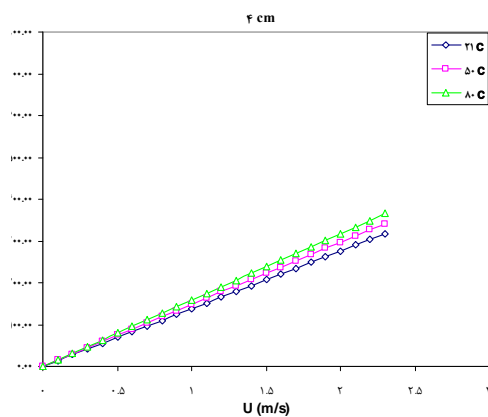
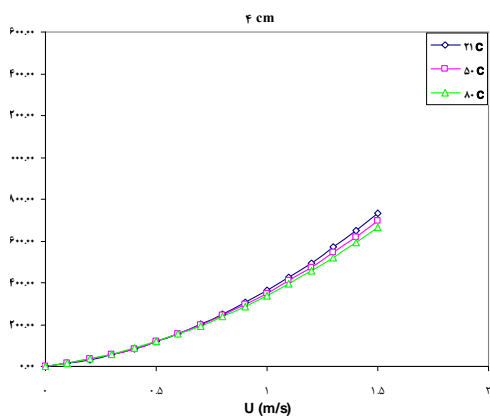
شکل ۵-۱۳ منحنی های افت فشار بی بعد بستر مواد در دما ها و ارتفاع بستر های مختلف افت فشار بستر در شرایط حداقل سیال سازی نیز برای دماهای مختلف بوسیله آزمایش تعیین شد که مقادیر آن در شکل ۵-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۴ افت فشار بستر مواد در شرایط حداقل سیال سازی برای دماهای مختلف در ارتفاع بسترهای متفاوت همانگونه که مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بستر میزان تغییرات افت فشار با افزایش دما، افزایش می یابد.

افت فشار بستر مواد حاصل از روابط Ergun و Kozeny-Carmen برای دماهای مختلف در سه ارتفاع بستر ۴، ۶ و ۸ cm محاسبه گردید که منحنی های مربوط به آن در شکل ۵-۱۵ آورده شده اند.

همانگونه که در شکل مشاهده می شود در هر دو رابطه با افزایش ارتفاع بستر افت فشار افزایش می یابد. در رابطه Ergun با افزایش دمای هوا، در سرعت های پایین ($U < 0.4$ m/s) ابتدا افت فشار بستر مواد افزایش و سپس کاهش می یابد. به نظر می رسد که $U = 0.4$ m/s برای منحنی افت فشار Ergun نقطه ویژه ای می باشد. چنانکه در منحنی های حاصل از رابطه Kozeny-Carmen مشاهده می شود با افزایش دمای هوا، افت فشار بستر مواد افزایش می یابد.



(a) Ergun

(b) Kozeny-Carmen

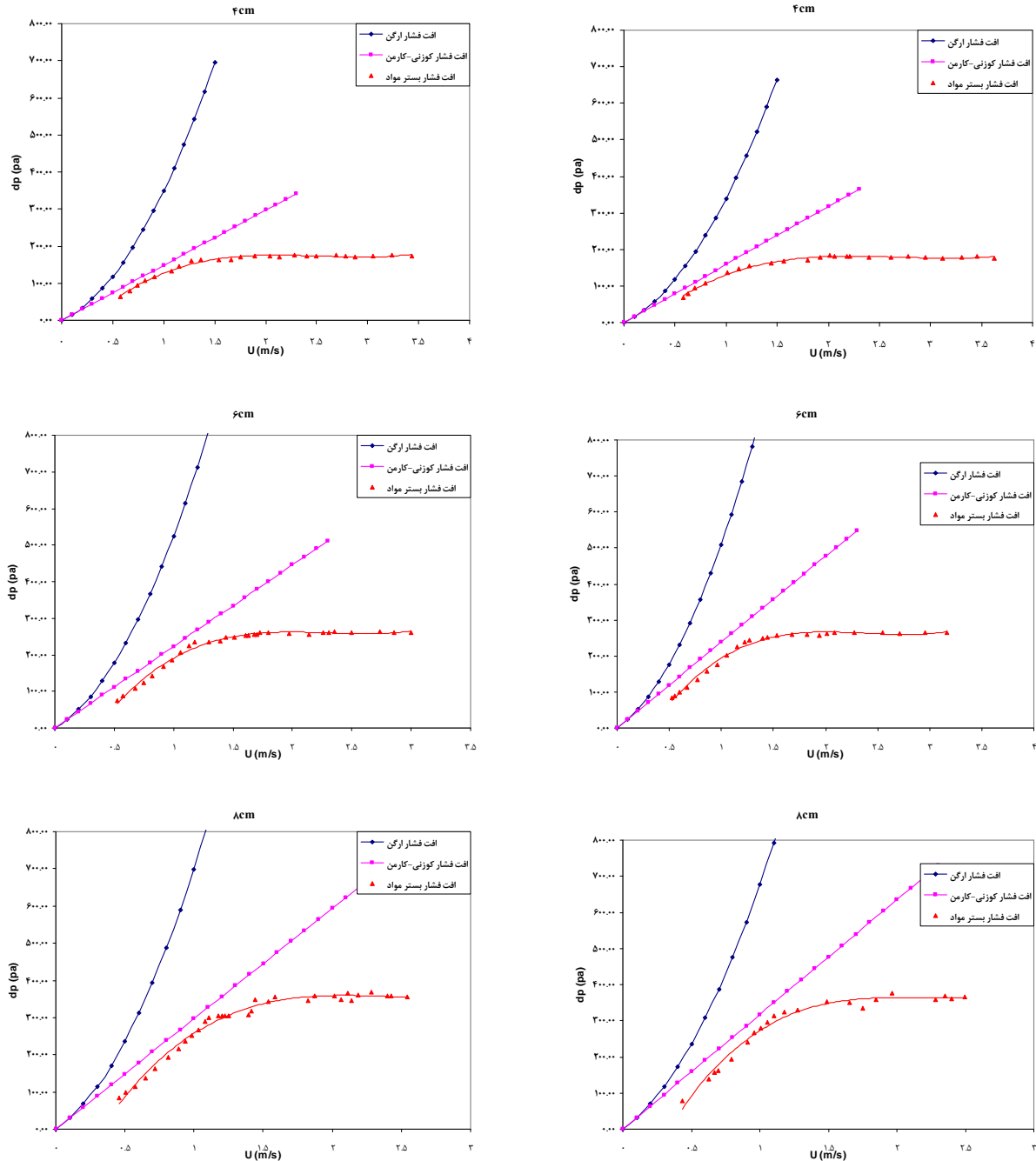
شکل ۵-۱۵ منحنی های افت فشار بدست آمده از روابط (a) Ergun و (b) Kozeny-Carmen برای دما های هوای مختلف در ارتفاع بستر های متفاوت

منحنی های افت فشار بستر مواد حاصل از نتایج آزمایشگاهی برای دما های ۵۰ و ۸۰°C در شکل

۵-۱۶ رسم و با مقادیر حاصل از روابط Ergun و Kozeny-Carmen مقایسه گردیده است.

همانگونه که مشاهده می شود این نتایج در محدوده سرعت ثابت با مقادیر بدست آمده از رابطه

Kozeny-Carmen تطابق بهتری دارند.



(a) $T=50^\circ\text{C}$

(b) $T=80^\circ\text{C}$

شکل ۵-۱۶ مقایسه منحنی های افت فشار بدست آمده از آزمایش و روابط Ergun و Kozeny-Carmen برای

ارتفاع بستر های متفاوت در دما های هوای (a) $T=50^\circ\text{C}$ و (b) $T=80^\circ\text{C}$

مقایسه بین مقادیر افت فشار بستر مواد حاصل از نتایج آزمایشگاهی و روابط مربوطه در جدول ۵-۱۱ ارائه شده است.

جدول ۵-۱۱ مقایسه بین مقادیر افت فشار بستر مواد حاصل از نتایج آزمایشگاهی و رابطه Kozeny-Carmen

	T=۲۱ °C	T=۵۰ °C	T=۸۰ °C
رابطه	انحراف از رابطه Kozeny-Carmen	انحراف از رابطه Kozeny-Carmen	انحراف از رابطه Kozeny-Carmen
۴ cm	۰/۳۸	۰/۲۰	۰/۲۳
۶ cm	۰/۱۸	۰/۲۸	۰/۳۵
۸ cm	۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۲۹

۵-۲-۳ تاثیر رطوبت اولیه دانه ها بر منحنی سیال سازی

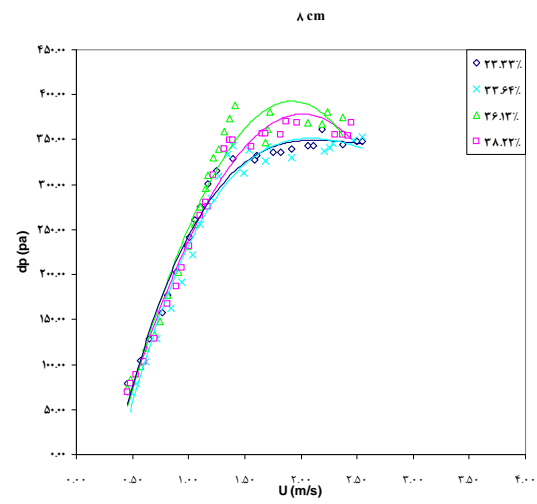
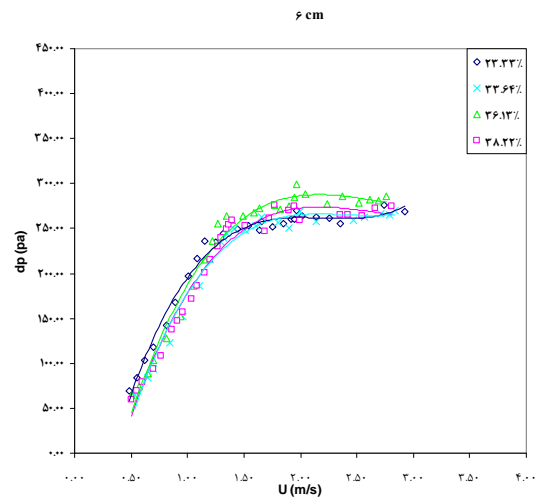
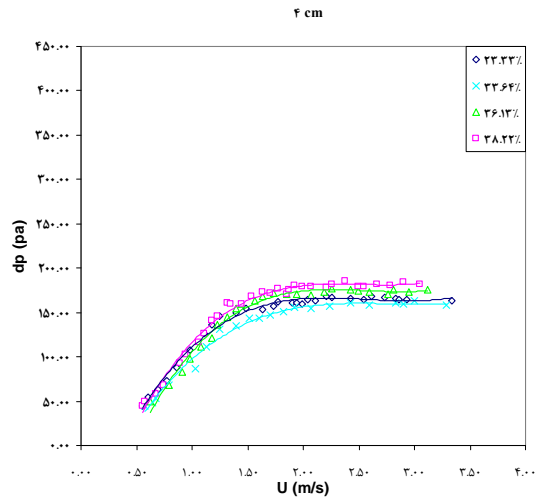
برای بررسی تاثیر رطوبت اولیه مواد بر منحنی سیال سازی آزمایشات مربوطه برای رطوبت های اولیه مختلف در ارتفاع بستر ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ m تکرار شد. نتایج حاصل از این آزمایشات در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل مشاهده می شود با افزایش رطوبت اولیه مواد افت فشار بستر مواد افزایش می یابد. بطور کلی می توان گفت ناحیه بستر ثابت تقریباً مستقل از رطوبت مواد می باشد اما با افزایش سرعت و شروع سیال سازی، با افزایش رطوبت اولیه افت فشار نیز افزایش می یابد.

مقادیر بدست آمده سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن برای رطوبت های مختلف در جدول ۵-۱۲ آورده شده است.

جدول ۵-۱۲ مقادیر بدست آمده سرعت حداقل سیال سازی و افت فشار مربوط به آن برای رطوبت های مختلف

ارتفاع	%۲۳/۳۳		%۳۳/۶۴		%۳۶/۱۳		%۳۸/۲۲		%۴۰/۷۹	
بستر	سرعت	افت فشار	سرعت	افت فشار	سرعت	افت فشار	سرعت	افت فشار	سرعت	افت فشار
۴cm	۱/۷۸	۱۶۱/۷۷	۱/۹۲	۱۵۵/۵۳	۱/۷۳	۱۷۲/۱۲	۱/۹۲	۱۸۰/۴۲	۱/۷۵	۱۵۴/۴۸
۶cm	۱/۶۶	۲۵۷/۳	۱/۹۹	۲۶۹/۲۲	۱/۷۸	۲۷۶/۲۳	۱/۷۸	۲۷۶/۲۳	۱/۸۲	۳۰۲/۵۵
۸cm	۱/۷۵	۳۳۶/۱۵	۱/۷	۳۴۱/۵۲	۱/۷۳	۳۸۱/۱۴	۱/۸۷	۳۶۹/۹۷	۱/۶۳	۳۸۵/۳۶

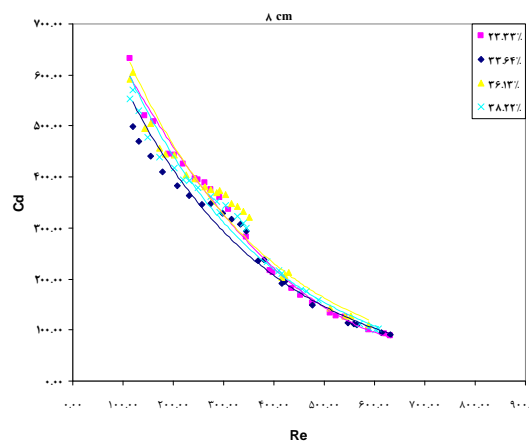
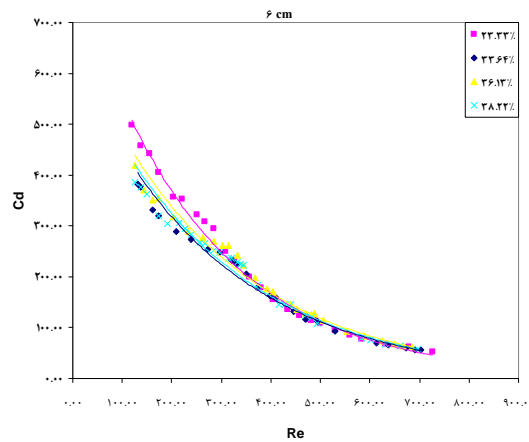
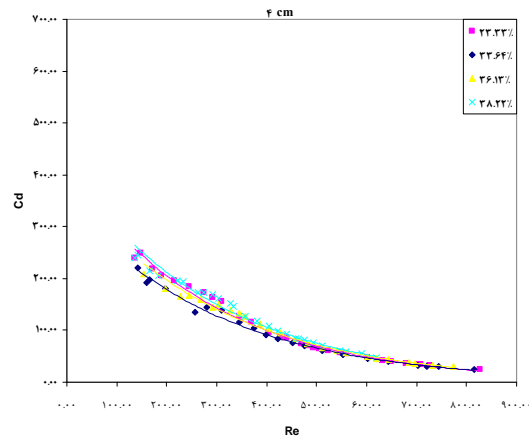


شکل ۵-۱۷ منحنی های افت فشار بستر مواد در رطوبت های اولیه مختلف شلتوک در ارتفاع بستر های ۰،۴ و ۰،۶

۸ cm

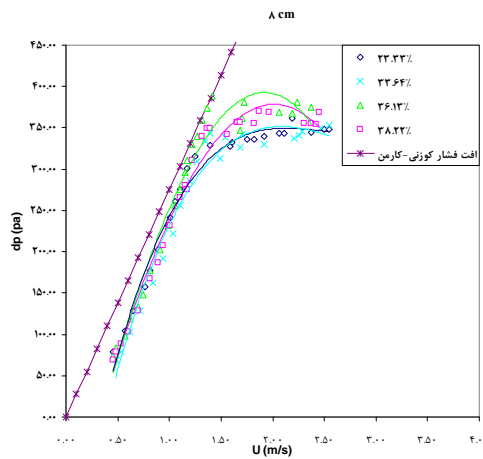
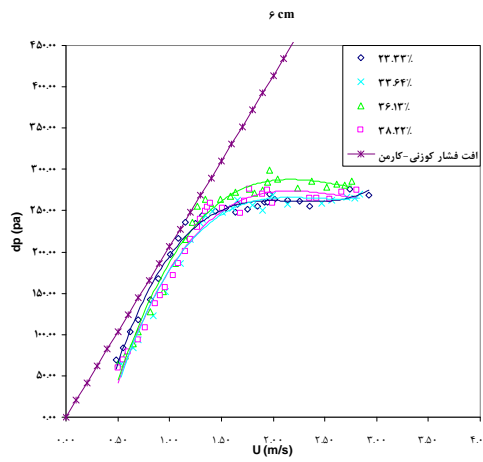
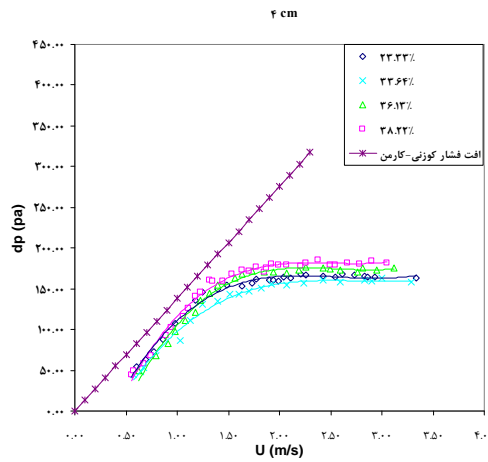
شکل ۵-۱۸ منحنی های افت فشار بی بعد بستر مواد با رطوبت های اولیه مختلف، در ارتفاع بستر

۰،۴، ۰،۶ و ۰،۸ m را نشان می دهد.



شکل ۵-۱۸ منحنی های افت فشار بی بعد بستر مواد با رطوبت های اولیه مختلف، در ارتفاع بستر ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ m

شکل ۵-۱۹ مقایسه بین منحنی های افت فشار در رطوبت های مختلف با منحنی حاصل از رابطه Kozeny-Carmen را نشان می دهد.



شکل ۵-۱۹ مقایسه بین منحنی های افت فشار در رطوبت های مختلف با منحنی حاصل از رابطه Carmen-Kozeny در ارتفاع بستر های مختلف اختلاف منحنی های حاصل از آزمایش و رابطه Kozeny-Carmen در جدول ۵-۱۳ آورده شده است.

جدول ۵-۱۳ اختلاف منحنی های حاصل از آزمایش و رابطه Kozeny-Carmen

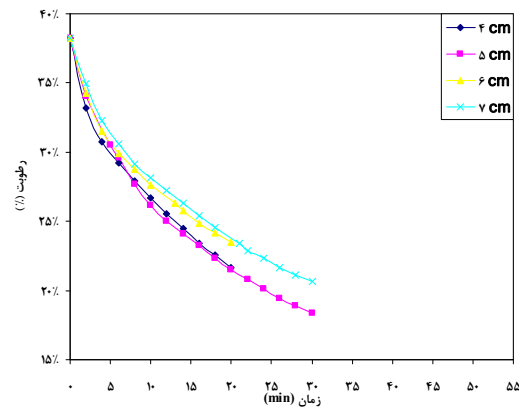
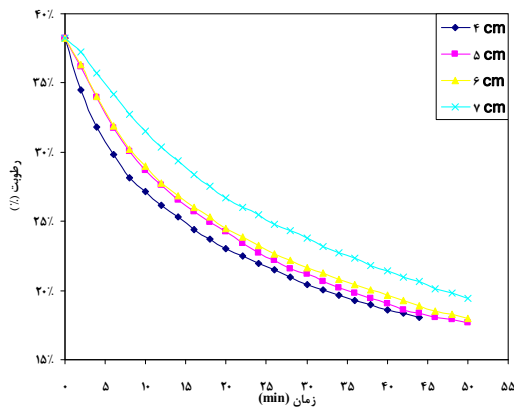
ارتفاع بستر	اختلاف از رابطه Kozeny-Carmen			
	%۲۳/۳۳	%۳۳/۶۴	%۳۶/۱۳	%۳۸/۲۲
۴ cm	%۳۸	%۶۲	%۴۱	%۳۴
۶ cm	%۱۸	%۳۷	%۲۹	%۳۱
۸ cm	%۲۷	%۴۲	%۲۴	%۳۲

۵-۲ سینتیک خشک کردن

در این بخش به بررسی منحنی های حاصل از فرایند خشک کردن می پردازیم.

۵-۲-۱ تاثیر ارتفاع بستر مواد بر سینتیک خشک کردن

برای بررسی تاثیر ارتفاع بستر مواد بر روند خشک کردن دانه ها، آزمایش بخش ۴-۱-۳ برای ارتفاع بستر های مختلف انجام شد. این مرحله با هوای خشک کننده با دمای °C ۶۰، در سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s و رطوبت اولیه ۳۸/۲۵٪، در ارتفاع بستر های ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶ و ۰/۰۷ انجام گردید که منحنی های حاصل از آنها در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است.



$$U_g = 0.8 \text{ m/s}$$

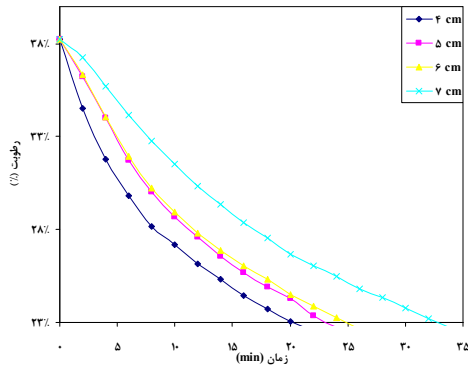
$$U_g = 1.8 \text{ m/s}$$

شکل ۵-۲۰ منحنی های خشک کردن شلتوک با رطوبت اولیه ۳۸/۲۵٪، در ارتفاع بستر های مختلف در سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s و دمای هوای ۶۰ °C همانگونه که مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بستر شیب منحنی کاهش می یابد. همچنین با افزایش سرعت از حالت بستر ثابت تا شرایط حداقل سیال سازی زمان لازم برای خشک کردن کاهش می یابد. با در نظر گرفتن کاهش محتوای رطوبت شلتوک ها به میزان ۴۰٪، محتوای رطوبت آنها از رطوبت اولیه ۳۸/۲۵٪ بر پایه خشک به رطوبت تقریبی ۲۳٪ خواهد رسید (شکل ۵-۲۱). مدت زمان لازم برای خشک کردن تا محتوای رطوبت ۲۳٪ برای ارتفاع بستر های مختلف در دو حالت بستر ثابت و حداقل شرایط سیال سازی در شکل ۵-۲۲ و جدول ۵-۱۴ ارائه شده است.

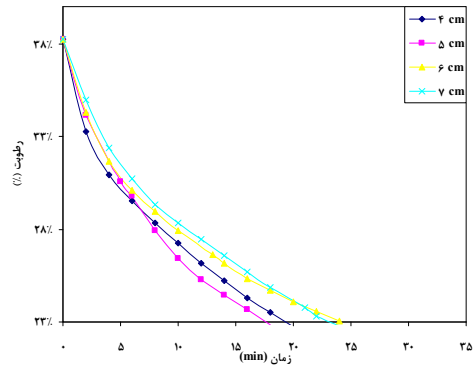
جدول ۵-۱۴ مدت زمان لازم برای کاهش رطوبت از ۳۸/۲۵٪ به ۲۳٪ بر پایه خشک، در ارتفاع بستر های مختلف و در شرایط بستر ثابت و بستر سیال

ارتفاع بستر	مدت زمان برای کاهش رطوبت به میزان ۴۰٪	
	$U_g = 0.8 \text{ m/s}$	$U_g = 1.8 \text{ m/s}$
۴ cm	۲۰	۱۹
۵ cm	۲۳	۱۸
۶ cm	۲۵	۲۴
۷ cm	۳۳	۲۳

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بستر زمان خشک کردن افزایش می یابد. همچنین زمان خشک کردن در شرایط حداقل سیال سازی نسبت به بستر ثابت کاهش قابل ملاحظه ای دارد.

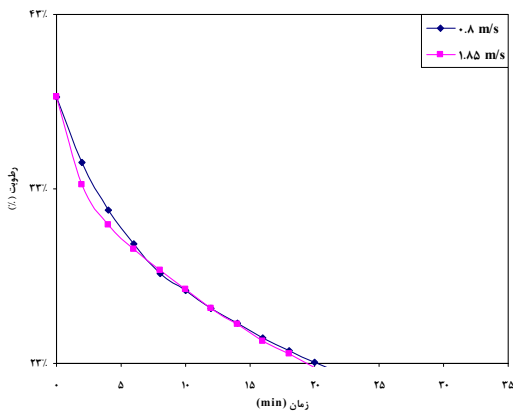


$$U_g = 0.8 \text{ m/s}$$

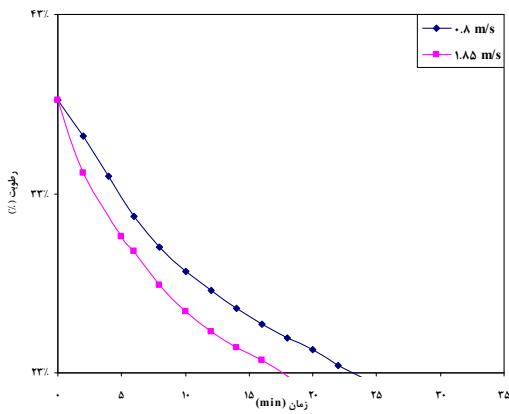


$$U_g = 1.85 \text{ m/s}$$

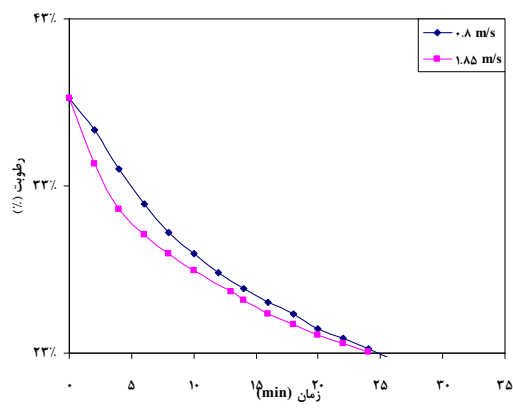
شکل ۵-۲۱ منحنی های مربوط به کاهش رطوبت از ۳۸/۲۵٪ به ۲۳٪ بر پایه خشک، در ارتفاع بستر های مختلف، در سرعت های ۰/۸ m/s و ۱/۸۵ m/s



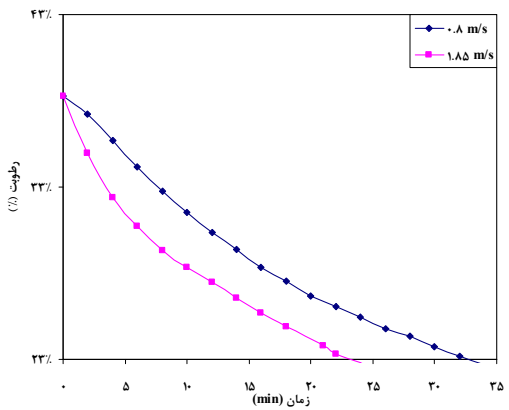
۴ cm



۵ cm



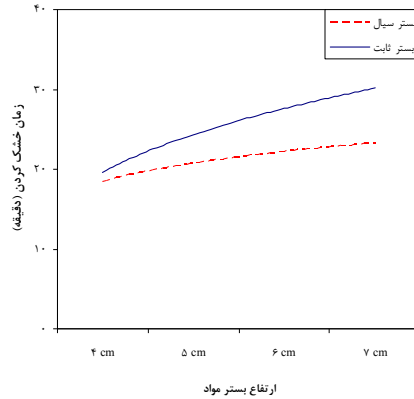
۶ cm



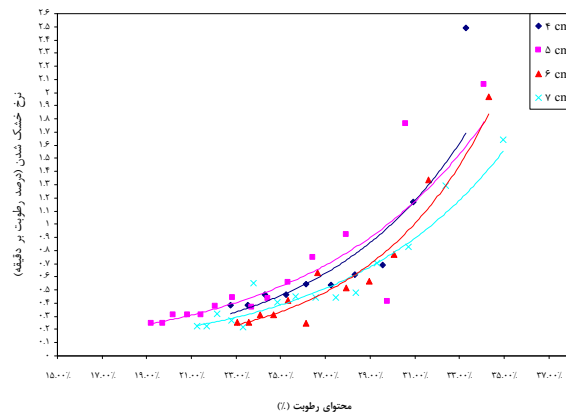
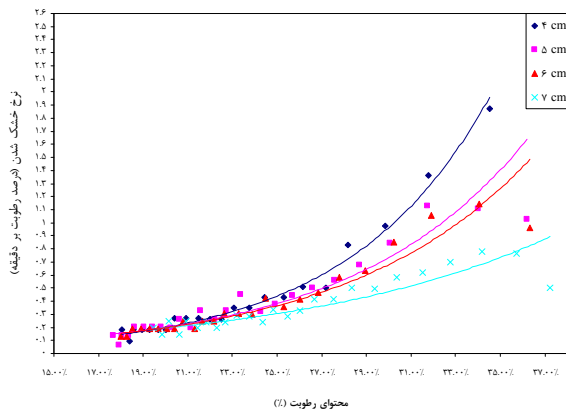
۷ cm

شکل ۲۲-۵ مقایسه منحنی های سینتیک خشک کردن در سرعت های ۰/۸ m/s و ۱/۸۵ در ارتفاع بستر های مختلف، دمای هوای ۶۰ °C و رطوبت اولیه ۳۸/۲۵٪

نمودارهای زمان خشک کردن از محتوای رطوبت ۳۸/۲۵٪ تا ۲۲/۹٪ (۴۰٪ کاهش)، در ارتفاع بستر های مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال در شکل ۲۳-۵ آورده شده است.



شکل ۲۳-۵ نمودارهای زمان خشک کردن در ارتفاع بستر های مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال همانگونه که مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بستر مواد زمان خشک کردن افزایش می یابد. همچنین زمان خشک کردن در شرایط بستر سیال نسبت به شرایط بستر ثابت کاهش می یابد. منحنی های نرخ خشک کردن برای ارتفاع بستر های مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال در شکل ۲۴-۵ رسم شده است.



$$U_g = 0.8 \text{ m/s}$$

$$U_g = 1.85 \text{ m/s}$$

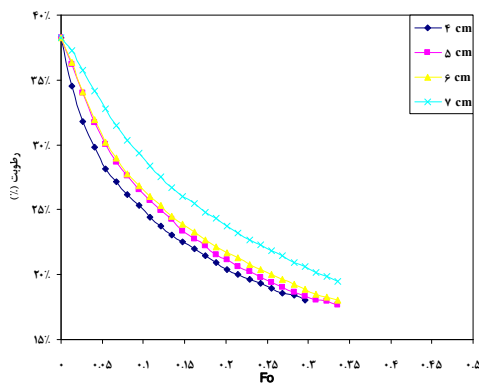
شکل ۲۴-۵ منحنی های نرخ خشک کردن برای ارتفاع بستر های مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال

همانگونه که در شکل مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بستر نرخ خشک کردن کاهش می یابد. همچنین در شرایط بستر سیال شیب منحنی نرخ خشک کردن بیشتر از منحنی مربوط به شرایط بستر ثابت می باشد که نشان دهنده بیشتر بودن شدت خشک کردن در شرایط بستر سیال می باشد.

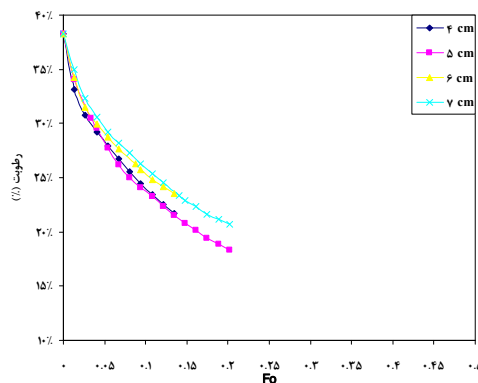
منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در شکل ۵-۲ رسم شده اند. برای انجام بی بعد سازی زمان در منحنی های سینتیک از عدد بدون بعد فوریه استفاده شد:

$$Fo = \frac{\alpha t}{d_p^2} \quad (۴-۵)$$

t زمان، d_p قطر دانه و α ضریب انتشار گرما می باشد که طبق رابطه (۲-۲۷) تعریف می شود. پس از انجام آزمایش نمونه هایی از سطح بستر مواد و کف بستر برداشته شد و رطوبت آنها تعیین گردید. محتوای رطوبت نمونه های مربوط به سطح و کف بستر در جدول ۵-۱۵ با یکدیگر مقایسه شده اند.



$U_g = 0.8 \text{ m/s}$



$U_g = 1.8 \text{ m/s}$

شکل ۵-۲۵ منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در عمق بستر های مختلف

جدول ۵-۱۵ مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در ارتفاع بستر های مختلف و سرعت های 0.8 m/s و

۱/۸۵

$U_g = 0.8 \text{ m/s}$

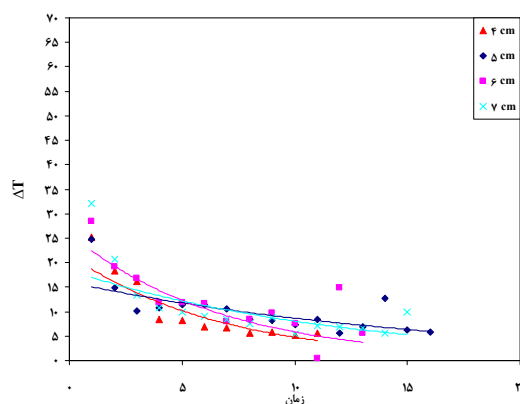
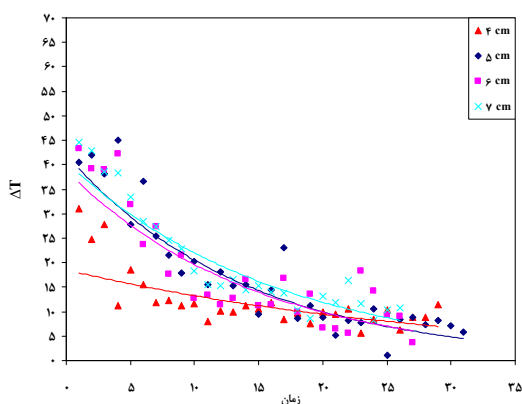
$U_g = 1.8 \text{ m/s}$

ارتفاع بستر	رطوبت سطح بستر	رطوبت کف بستر	اختلاف رطوبت	رطوبت سطح بستر	رطوبت کف بستر	اختلاف رطوبت
۴ cm	%۱۴/۲۴	%۱۲/۴۵	%۱۴/۳۸	%۲۱/۲۸	%۲۰/۲۵	%۵/۱۰
۵ cm	%۱۴/۱۴	%۱۲/۳۳	%۱۴/۶۷	%۱۶/۲۳	%۱۶/۲۱	%۰/۱۵
۶ cm	%۲۷/۳۱	%۱۳/۱۹	%۷۲/۸۱	%۲۱/۸۶	%۲۰/۲۳	%۸/۰۴
۷ cm	%۲۹/۰۶	%۱۴/۹۲	%۹۴/۷۷	%۱۹/۳۲	%۱۷/۶۶	%۹/۳۸

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بستر اختلاف محتوای رطوبت سطح و کف بستر افزایش می یابد. همچنین با افزایش سرعت هوا در شرایط حداقل سیال سازی اختلاف محتوای رطوبت این دو نقطه کاهش می یابد که نشان دهنده یکنواخت تر شدن فرآیند خشک کردن می باشد.

منحنی های مربوط به اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال در شکل ۵-۲۶ رسم شده است.

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بستر اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی افزایش می یابد. چنانچه در شکل نشان داده شده در شرایط بستر سیال به علت افزایش نرخ انتقال حرارت و یکنواختی بیشتر آن منحنی های اختلاف دما به یکدیگر نزدیکترند که این بیانگر این مطلب است که با افزایش سرعت سیال اختلاف دمای ورودی و خروجی کاهش می یابد. با سپری شدن زمان اختلاف دمای ورودی و خروجی یافته و حداقل به 5°C می رسد.

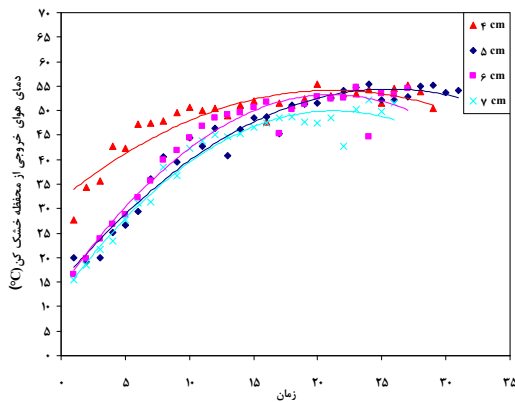


$$U_g = 0.8 \text{ m/s}$$

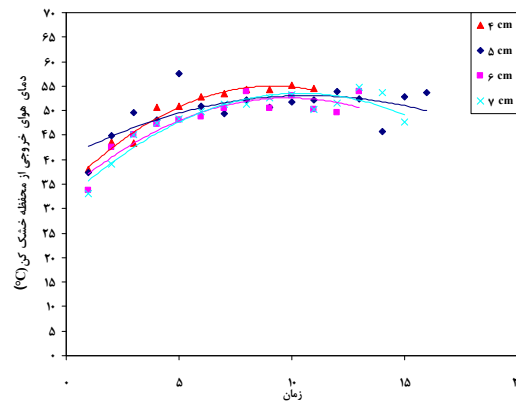
$$U_g = 1.85 \text{ m/s}$$

شکل ۵-۲۶ منحنی های اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال

همچنین با بررسی منحنی های مربوط به دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن (شکل ۵-۲۷) مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بستر مواد دمای هوای خروجی کاهش می یابد. با سپری شدن زمان دمای هوای خروجی به دمای هوای ورودی (60°C) نزدیکتر می شود. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش سرعت هوا و در شرایط بستر سیال دمای هوای خروجی به دمای هوای ورودی نزدیکتر خواهد بود.



$$U_g = 0.8 \text{ m/s}$$

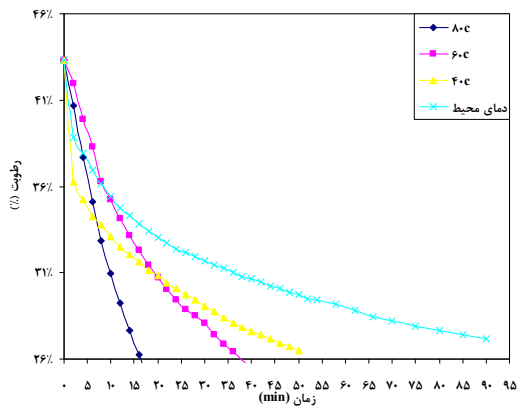


$$U_g = 1.85 \text{ m/s}$$

شکل ۵-۲۷ منحنی های مربوط به دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال

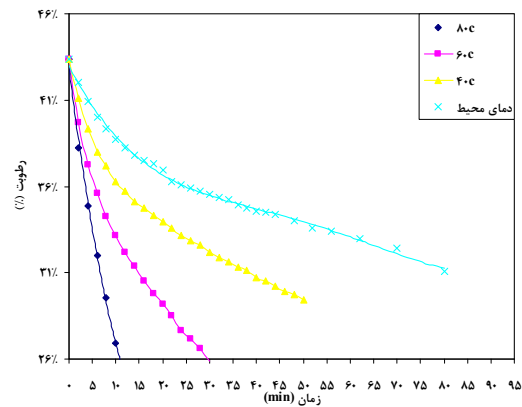
۵-۲-۲ تاثیر دمای هوای ورودی بر سینتیک خشک کردن

برای بررسی تاثیر دمای هوای خشک کننده بر روند خشک کردن دانه ها، آزمایش بخش ۴-۱-۳ با هوای ورودی با دماهای مختلف انجام شد. این مرحله در سرعت های 0.8 و 1.85 m/s و رطوبت اولیه $3/43\%$ ، در ارتفاع بستر 0.06 m ، با هوای خشک کننده با دماهای 40 ، 60 و 80°C و همچنین در دمای محیط انجام شد که منحنی های حاصل از آنها در شکل ۵-۲۸ نشان داده شده است.



$$U_g = 0.8 \text{ m/s}$$

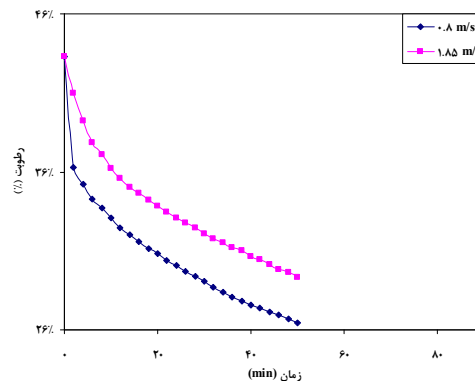
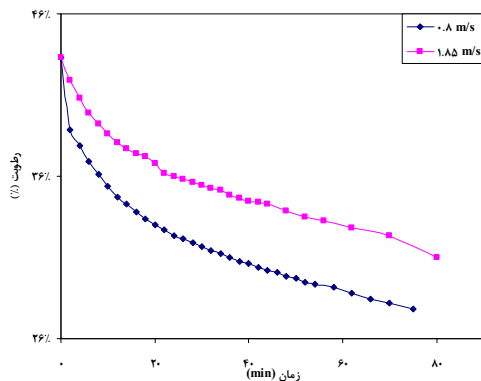
شکل ۵-۲۸ منحنی های خشک کردن شلتوک با رطوبت اولیه ۴۳/۳٪ در ارتفاع بستر ۰/۰۶m با دماهای هوای مختلف در سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s

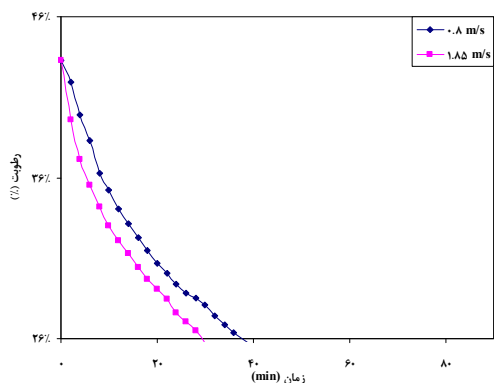


$$U_g = 1.85 \text{ m/s}$$

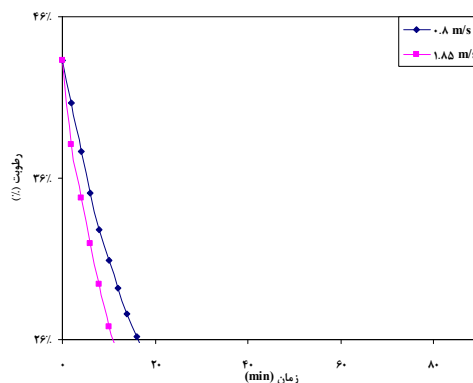
همانگونه که در شکل ملاحظه می شود با افزایش دمای هوای ورودی شیب منحنی خشک کردن تند تر می شود و در نتیجه زمان خشک کردن کاهش می یابد. همچنین با افزایش سرعت از حالت بستر ثابت و شروع سیال سازی این شدت خشک کردن مجدداً افزایش می یابد. مقایسه منحنی های خشک کردن در دو حالت بستر ثابت و بستر سیال در دماهای هوای ورودی مختلف در شکل ۵-۲۹ نشان داده شده است.

همانگونه که مشاهده می شود در دماهای بالا (۶۰ و ۸۰ °C) مدت زمان خشک کردن در شرایط بستر سیال کمتر می باشد. حال آنکه در دماهای پایین (دمای محیط و ۴۰ °C) مدت زمان خشک کردن در این حالت افزایش یافته است.





۶۰ °C

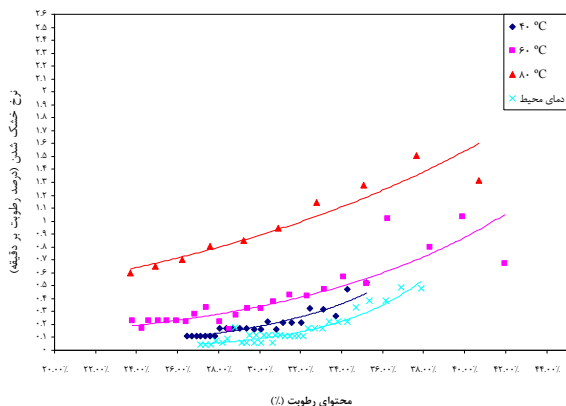


۸۰ °C

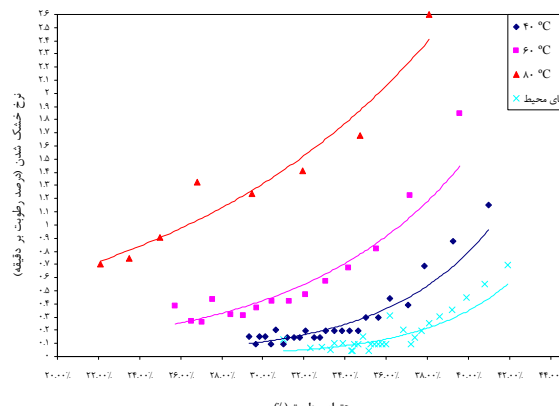
شکل ۵-۲۹ مقایسه منحنی های خشک کردن در دو حالت بستر ثابت و بستر سیال در دماهای هوای ورودی مختلف

منحنی های نرخ خشک کردن در دماهای مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال در شکل ۵-۳۰

۳۰ رسم شده است.



$U_g = 0.8 \text{ m/s}$



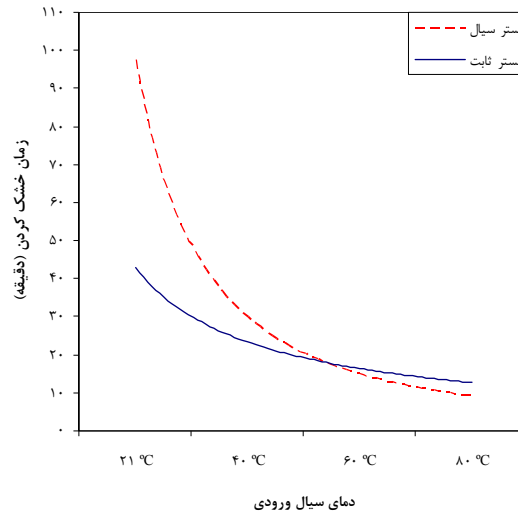
$U_g = 1.85 \text{ m/s}$

شکل ۵-۳۰ منحنی های نرخ خشک کردن در دماهای مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال

همانگونه که در شکل نشان داده شده است با افزایش دمای هوای ورودی نرخ خشک کردن افزایش می یابد. همچنین با افزایش سرعت هوا و شروع شرایط بستر سیال شیب منحنی تند تر می شود و به این ترتیب شدت سرعت خشک کردن افزایش می یابد.

مدت زمان خشک کردن برای کاهش رطوبت از محتوای رطوبت $43/3\%$ تا $30/3\%$ (30% کاهش)، در شرایط بستر ثابت و بستر سیال در دماهای مختلف هوای ورودی در شکل ۵-۳۱ مقایسه گردیده است.

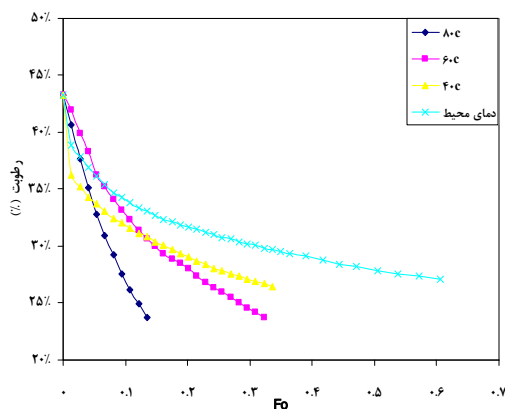
همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دمای سیال ورودی زمان خشک کردن کاهش می یابد. همچنین در دماهای بالا (60°C و 80°C) افزایش سرعت (شرایط بستر سیال) موجب کاهش بیشتر زمان خشک کردن می شود.



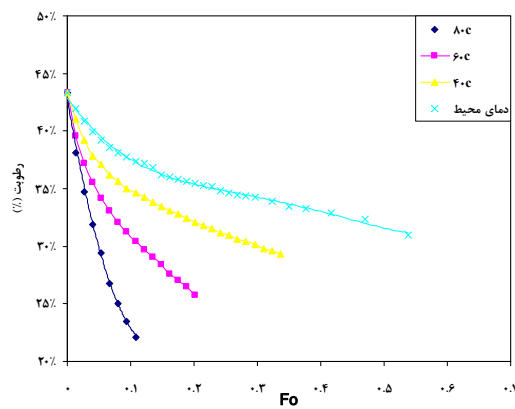
شکل ۵-۳۱ مدت زمان خشک کردن برای کاهش رطوبت از محتوای رطوبت $43/3\%$ تا $30/3\%$ (30% کاهش)، در شرایط بستر ثابت و بستر سیال در دماهای مختلف هوای ورودی

منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در شکل ۵-۳۳

رسم شده اند.



$$U_g = 0.8 \text{ m/s}$$



$$U_g = 1.8 \text{ m/s}$$

شکل ۵-۳۲ منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در دماهای مختلف

مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در دماهای مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال

در جدول ۵-۱۶ آورده شده است.

جدول ۵-۱۶ مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در دماهای مختلف و سرعت های ۰.۸ و ۱.۸۵ m/s

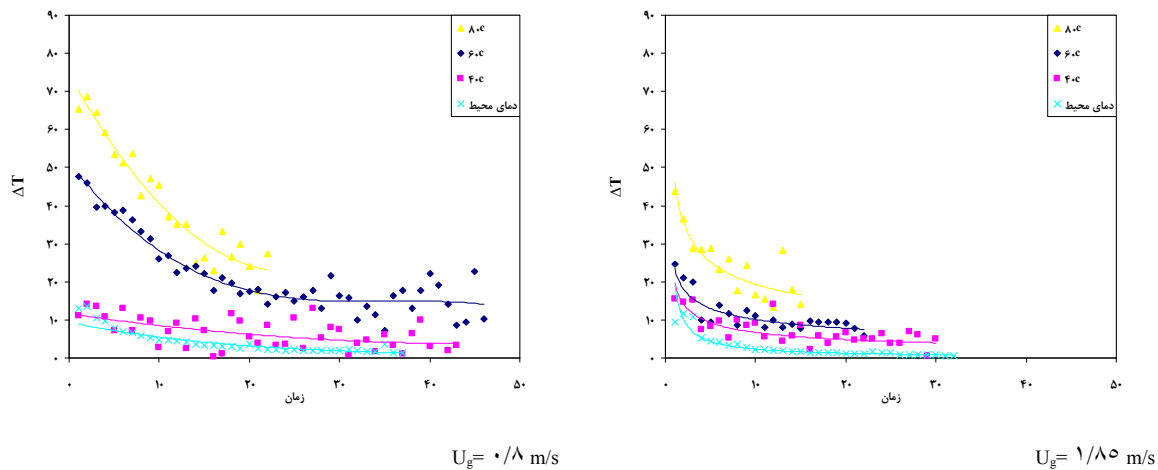
اختلاف رطوبت	$U_g = 0.8 \text{ m/s}$			$U_g = 1.8 \text{ m/s}$		
	رطوبت کف بستر	رطوبت سطح بستر	اختلاف رطوبت	رطوبت کف بستر	رطوبت سطح بستر	اختلاف رطوبت
۰.۵۲%	۲۹/۰۴%	۲۸/۳۰%	۲/۷۰%	۲۹/۱۹%	۲۹/۰۴%	۰.۵۲%
۱.۲۳%	۲۴/۷۳%	۲۱/۵۵%	۴/۲۷%	۲۵/۰۳%	۲۴/۷۳%	۱.۲۳%
۲۰.۰۳%	۱۷/۵۹%	۱۷/۳۹%	۶/۷۶%	۲۱/۱۱%	۱۷/۵۹%	۲۰.۰۳%
۴.۳۷%	۱۶/۸۰%	۱۶/۹۹%	۳۴/۰۷%	۱۷/۵۴%	۱۶/۸۰%	۴.۳۷%

همانگونه که مشاهده می شود در شرایط بستر ثابت با افزایش دما اختلاف محتوای رطوبت سطح

و کف بستر افزایش می یابد. در شرایط حداقل سیال سازی این اختلاف به نسبت شرایط بستر

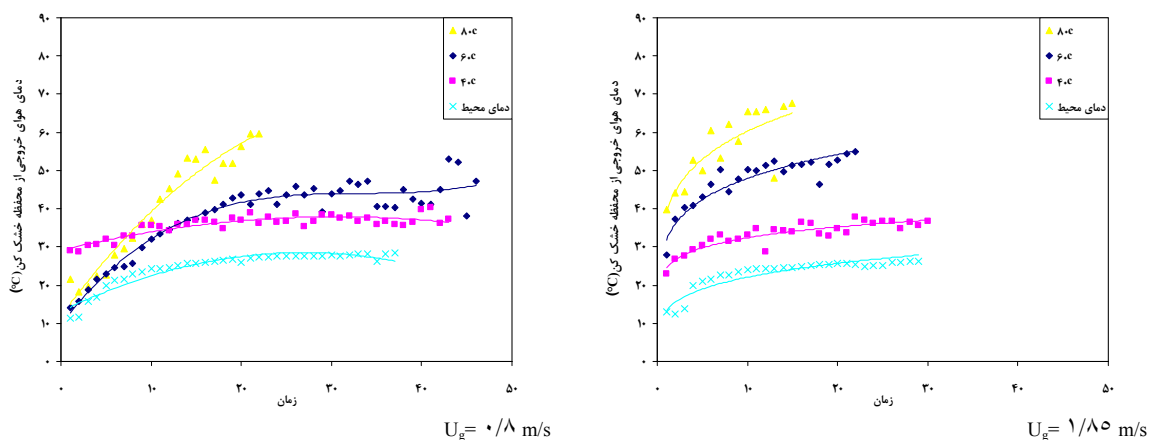
ثابت کاهش می یابد اما می توان گفت با افزایش دما این اختلاف افزایش یافته است.

منحنی های مربوط به اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال در شکل ۳۳-۵ رسم شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دمای هوای ورودی، شیب منحنی اختلاف دما افزایش می یابد. این بدان معناست که هرچه دمای هوای ورودی بیشتر باشد نرخ کاهش اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی افزایش می یابد. این امر در شرایط بستر سیال با شدت بیشتری نسبت به شرایط بستر ثابت مشاهده می شود و میزان دمای هوای خروجی با سرعت بیشتری به دمای هوای ورودی نزدیک می شود.



شکل ۳۳-۵ منحنی های اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال

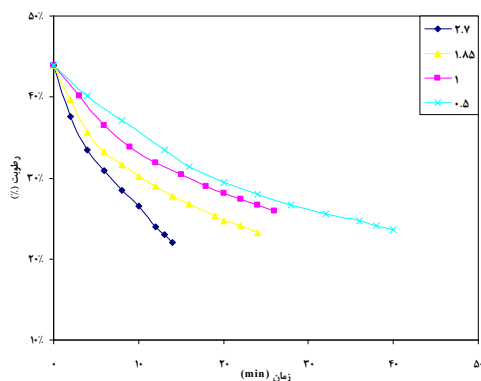
منحنی های مربوط به دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن نیز در شکل ۳۴-۵ مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که مشاهده می شود در اینجا نیز با افزایش دمای هوای ورودی شیب منحنی برای نزدیک شدن دمای هوای خروجی به هوای ورودی تند تر می باشد. این امر با افزایش سرعت هوا و ایجاد شرایط بستر سیال تشدید می شود.



شکل ۳۴-۵ منحنی های مربوط به دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن در شرایط بستر ثابت و سیال

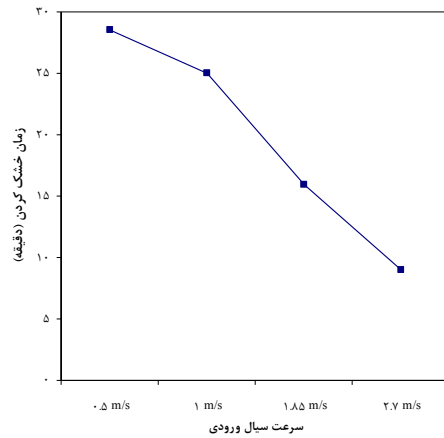
۳-۲-۵ تاثیر سرعت هوا بر سینتیک خشک کردن

بمنظور بررسی تاثیر سرعت هوای خشک کننده بر روند خشک کردن دانه ها، آزمایش بخش ۴-۳ برای سرعت های مختلف هوا انجام شد. در این مرحله دمای هوای خشک کننده 60°C ، در ارتفاع بستر 0.06m و رطوبت اولیه $43/92\%$ ، در سرعت های 0.5 ، 1 ، 1.85 و 2.7 m/s انجام گردید که منحنی های حاصل از آنها در شکل ۳۵-۵ نشان داده شده است.



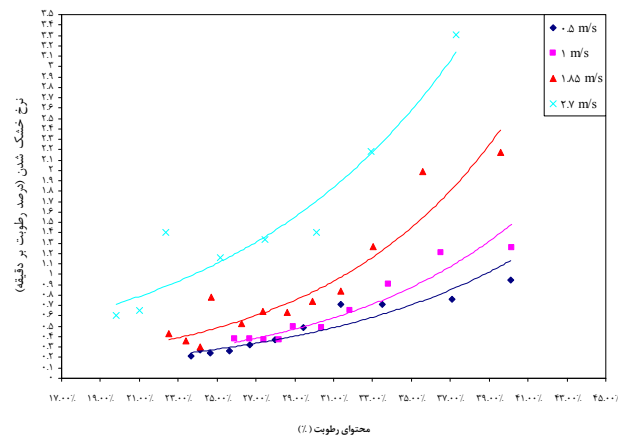
شکل ۳۵-۵ منحنی های خشک کردن شلتوک با سرعت های هوای ورودی مختلف

همانگونه که در شکل مشاهده می شود با افزایش سرعت هوای ورودی شیب منحنی خشک کردن افزایش یافته که به نوبه خود موجب کاهش زمان خشک کردن می گردد. نمودار زمان خشک کردن از محتوای رطوبت $43/9\%$ تا $26/3\%$ (40% کاهش) در سرعت های مختلف در شکل ۳۶-۵ رسم شده است.



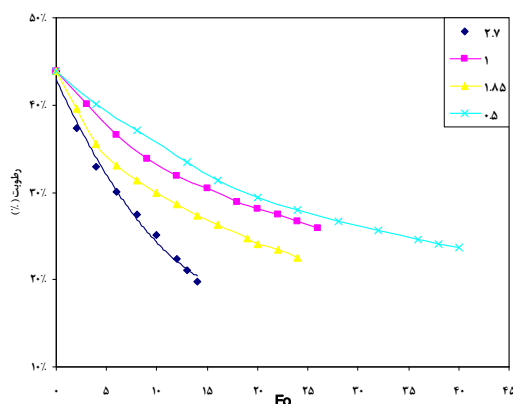
شکل ۵-۳۶ نمودار زمان خشک کردن در سرعت های هوای ورودی مختلف

منحنی های نرخ خشک کردن در سرعت های مختلف نیز در شکل ۵-۳۷ رسم شده اند. همانگونه که در شکل نشان داده شده است با افزایش سرعت سیال نرخ خشک کردن افزایش می یابد. همچنین با افزایش سرعت سیال شیب منحنی تند تر می گردد که نشان دهنده افزایش نرخ خشک کردن می باشد.



شکل ۵-۳۷ منحنی های نرخ خشک کردن در سرعت های مختلف

منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در شکل ۵-۳۸ رسم شده اند.



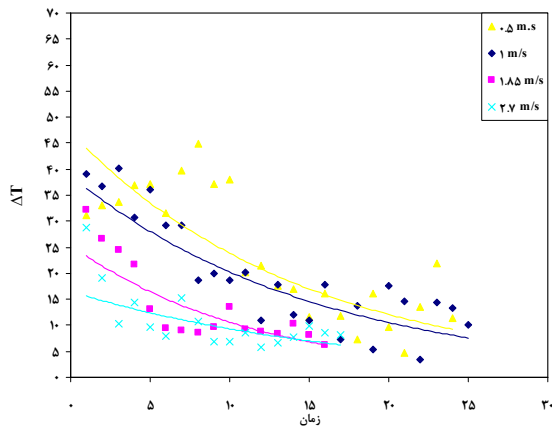
شکل ۳۸-۵ منحنی بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در سرعت های مختلف

مقایسه میزان محتوای رطوبت سطح و کف بستر در این حالت در جدول ۵-۱۷ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش سرعت هوای ورودی و مغشوش شدن بستر مواد انتقال حرارت بصورت یکنواخت تر انجام می شود در نتیجه اختلاف رطوبت بین نقاط مختلف بستر کاهش می یابد.

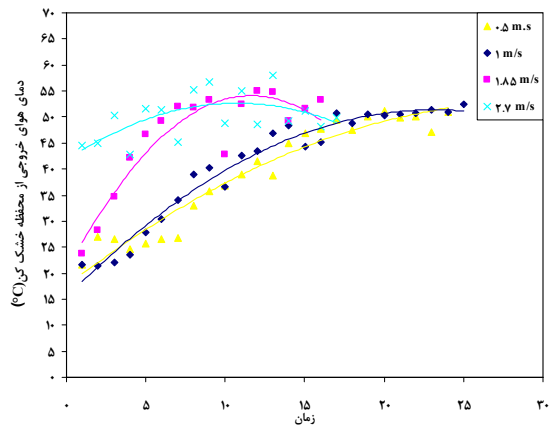
جدول ۵-۱۷ مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در سرعت های مختلف

هوای	سرعت ورودی	رطوبت سطح بستر	رطوبت کف بستر	اختلاف رطوبت
	۰/۵ m/s	%۲۳/۰۶	%۲۰/۲۸	%۱۳/۷۱
	۱ m/s	%۲۳/۷۸	%۲۱/۴۸	%۱۰/۷۱
	۱/۸۵ m/s	%۱۹/۵۲	%۱۹/۳۷	%۰/۷۵
	۲/۷ m/s	%۲۳/۵۳	%۲۳/۹۴	%-۱/۷۲

شکل ۳۹-۵ منحنی های مربوط به اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی (a) و دمای هوای خروجی محفظه خشک کن (b) را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش سرعت سیال اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی کاهش می یابد. همچنین با افزایش سرعت دمای هوای خروجی با سرعت بیشتری افزایش می یابد.



(a)

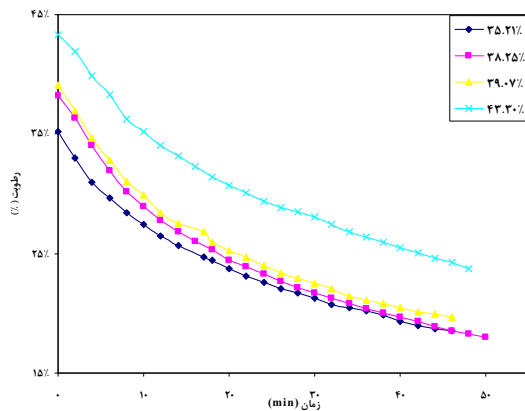


(b)

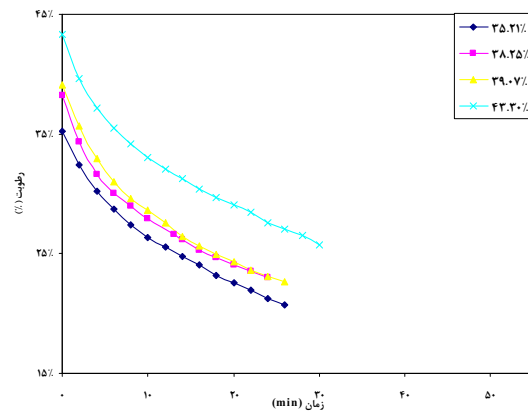
شکل ۳۹-۵ منحنی های (a) اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی و (b) دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن

۴-۲-۵ تاثیر رطوبت اولیه شلتوک بر سینتیک خشک کردن

بمنظور بررسی تاثیر رطوبت اولیه مواد بر روند خشک کردن دانه ها، آزمایش بخش ۳-۱-۴ برای رطوبت های اولیه مختلف شلتوک انجام شد. در این مرحله دمای هوای خشک کننده 60°C ، ارتفاع بستر ۶ cm در سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s برای رطوبت های اولیه ۳۵/۲۱٪، ۳۸/۲۵٪، ۳۹/۰۷٪ و ۴۳/۳۰٪ انجام گردید که منحنی های حاصل از آنها در شکل ۴۰-۵ نشان داده شده است.



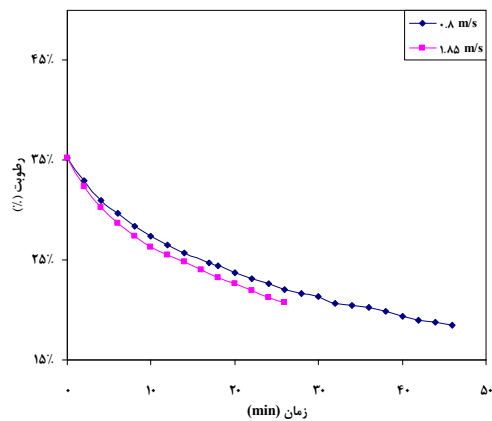
$U_g = 0.8 \text{ m/s}$



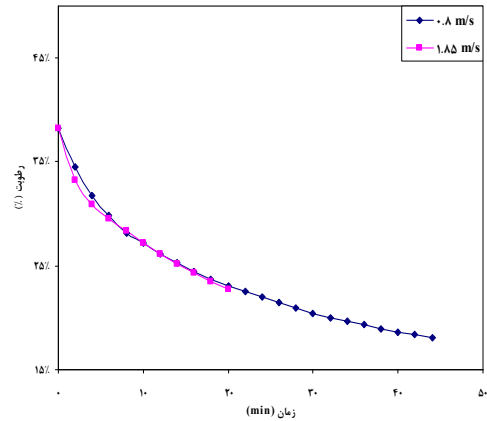
$U_g = 1.85 \text{ m/s}$

شکل ۵-۴۰ منحنی های خشک کردن شلتوک با رطوبت اولیه های مختلف در ارتفاع بستر ۰/۰۶ m و سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s

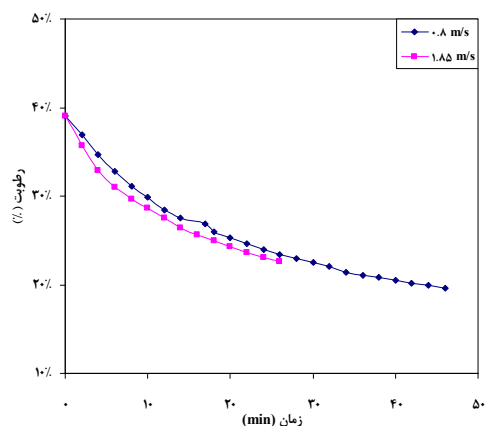
همانگونه که مشاهده می شود افزایش رطوبت اولیه موجب افزایش زمان خشک کردن دانه ها می گردد. اما با افزایش سرعت سیال، چنانچه در شکل ۵-۴۱ نشان داده شده است، زمان لازم برای خشک کردن در حالت بستر سیال نسبت به بستر ثابت کاهش می یابد.



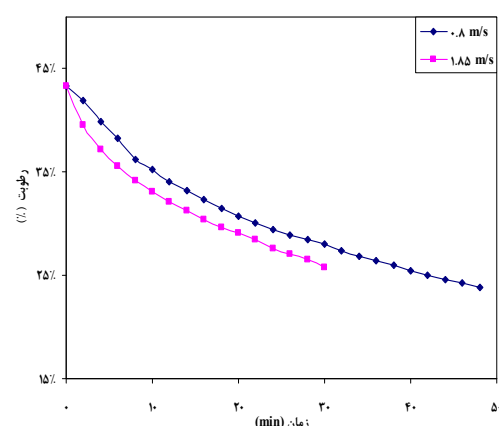
محتوای رطوبت ۳۵/۲۱%



محتوای رطوبت ۳۸/۲۵%



محتوای رطوبت ۳۹/۰۷%



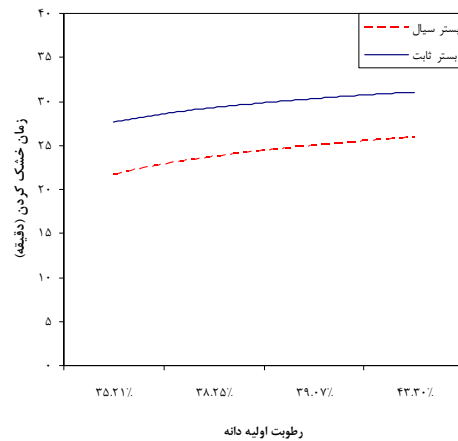
محتوای رطوبت ۴۳/۳%

شکل ۵-۴۱ مقایسه منحنی های خشک کردن برای رطوبت های اولیه مختلف در شرایط بستر ثابت و بستر سیال

نمودار زمان خشک کردن برای کاهش ۴۰٪ محتوای رطوبت از نمونه های شلتوک با رطوبت اولیه

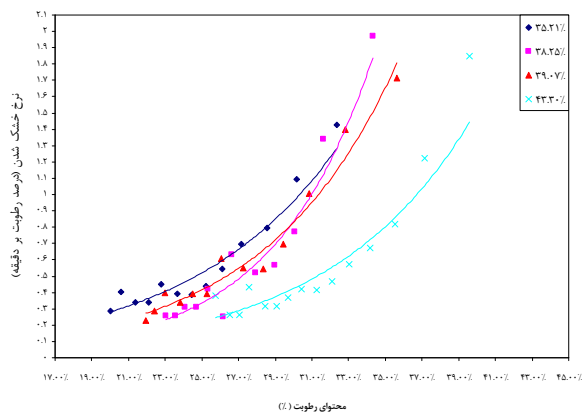
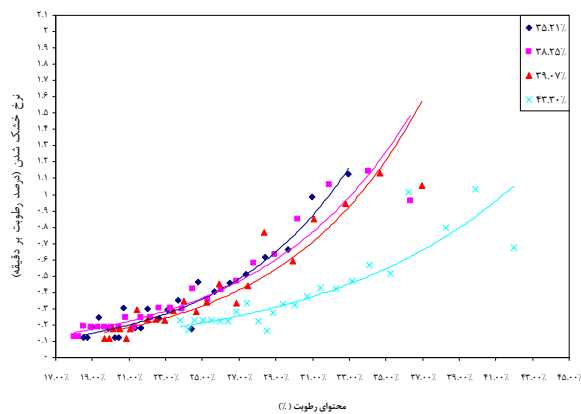
های مختلف و مقایسه آنها در شرایط بستر ثابت و سیال در شکل ۵-۴۲ رسم شده است.

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش رطوبت اولیه دانه ها مدت زمان لازم برای کاهش میزان مشخصی رطوبت افزایش می یابد. همچنین زمان خشک کردن در شرایط بستر سیال کمتر از شرایط بستر ثابت می باشد.



شکل ۴۲-۵ نمودار زمان خشک کردن برای کاهش ۴۰٪ محتوای رطوبت از نمونه های شلتوک با رطوبت اولیه های مختلف

منحنی های نرخ خشک کردن برای شلتوک با رطوبت اولیه های مختلف در شرایط بستر سیال و بستر ثابت در شکل ۴۳-۵ رسم شده است.



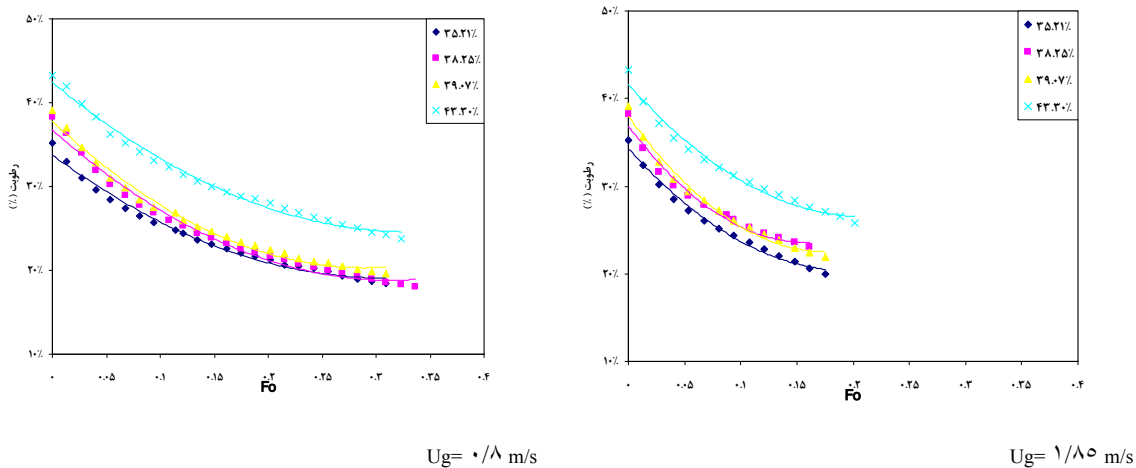
$$U_g = 0.18 \text{ m/s}$$

$$U_g = 1/80 \text{ m/s}$$

شکل ۴۳-۵ منحنی های نرخ خشک کردن برای شلتوک با رطوبت اولیه های مختلف در شرایط بستر سیال و بستر ثابت

همانگونه که در شکل مشاهده می شود افزایش رطوبت اولیه شلتوک موجب کاهش نرخ خشک کردن می گردد. البته با افزایش سرعت هوا، شیب منحنی در شرایط بستر سیال نسبت به شرایط بستر ثابت تند تر شده و بدین ترتیب سرعت خشک کردن افزایش می یابد.

منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال در شکل ۵-۴۴ رسم شده اند.



شکل ۴۴-۵ منحنی های بدون بعد سینتیک خشک کردن برای شرایط بستر ثابت و بستر سیال برای رطوبت های اولیه مختلف شلتوک

جدول ۵-۱۸ مقادیر رطوبت شلتوک در سطح و کف بستر پس از فرایند خشک کردن را نشان می دهد. با توجه به این مقادیر می توان گفت با افزایش رطوبت اولیه شلتوک اختلاف رطوبت در سطح و کف بستر که نشان دهنده غیر یکنواختی فرایند خشک کردن می باشد، افزایش می یابد.

جدول ۵-۱۸ مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در رطوبت های مختلف و سرعت های ۰/۸ و ۱/۸۵ m/s

$U_g = 0.8 \text{ m/s}$				$U_g = 1.8 \text{ m/s}$			
اختلاف رطوبت	رطوبت کف	رطوبت سطح	رطوبت اولیه شلتوک	اختلاف رطوبت	رطوبت کف	رطوبت سطح	رطوبت اولیه شلتوک
۲/۵۵%	۱۶/۸۸%	۱۷/۳۱%	۳۵/۲۱%	۴/۸۵%	۱۳/۸%	۱۴/۴۷%	۳۵/۲۱%
۸/۰۴%	۲۰/۲۳%	۲۱/۸۶%	۳۸/۲۵%	۷۲/۸۱%	۱۵/۸%	۲۷/۳۱%	۳۸/۲۵%
۰/۰۲%	۱۷/۹۳%	۱۷/۹۴%	۳۹/۰۷%	۵/۳۲%	۱۴/۴۹%	۱۵/۲۶%	۳۹/۰۷%

%۴۳/۳

%۱۸/۵۷

%۱۷/۳۹

%۶/۷۶

%۲۱/۱۱

%۱۷/۵۹

%۲۰/۰۳

فصل ششم

جمع بندی و پیشنهادات

در این بخش ابتدا به مرور اجمالی دستگاه طراحی شده و ذکر ویژگی های آن می پردازیم. سپس نتایج حاصل از آزمایشهای انجام شده را در دو بخش سیال سازی و سینتیک خشک کردن را مورد بررسی قرار می دهیم. در پایان به بیان مواردی در جهت بهبود عملکرد دستگاه و فرآیند خشک کردن و تحقیق انجام شده خواهیم پرداخت.

۶-۱ مشخصات کلی دستگاه ساخته شده

اجزاء تشکیل دهنده ساختمان دستگاه عبارتند از:

■ محفظه خشک کن به صورت استوانه ای به قطر 0.2 m و ارتفاع 0.45 m از ورق آلومینیومی به ضخامت 0.001 m همراه با یک دریچه بازدید ساخته شد.

■ صفحه توزیع کننده از یک ورق فلزی به قطر 0.2 m و ضخامت 0.001 m ، با درجه آزادی 0.8% و سوراخهایی به قطر 0.003 m که با ترتیب مثلثی چیده شده اند تهیه گردید.

■ محفظه یکنواخت کننده جریان هوا به صورت استوانه ای به قطر 0.2 m و ارتفاع 0.9 m ساخته شد.

■ شاسی به منظور قرار گیری صحیح و بهینه اجزاء ساختمان خشک کن از جنس آهن طراحی و ساخته شد.

نحوه طراحی و نصب این اجزاء بگونه ای در نظر گرفته شد که امکان خارج کردن محفظه خشک کن به منظور توزین در مرحله بررسی سینتیک خشک کردن به شکل مناسبی صورت گیرد.

■ بمنظور تامین فشار مورد نیاز دستگاه جهت غلبه بر افت فشار ناشی از بستر مواد، با در نظر گرفتن افت فشار حداکثر که مربوط به بیشترین میزان عمق بستر مواد (0.08 m) و سرعت حامل می باشد حداقل فشار استاتیک $1826/87\text{ pa}$ و دبی هوای $0.204\text{ m}^3/\text{s}$ محاسبه گردید. با توجه به مقادیر محاسبه شده دمنده مدل TLZ 180 ساخت شرکت Comefri، از نوع سانتریفوژی با پره های جلوگرد باریک انتخاب گردید. این دمنده دارای موتوری با توان 0.55 kW می باشد.

■ بمنظور تامین انرژی حرارتی مورد نیاز فرآیند خشک کردن از یک کوره حرارتی استفاده شد. با توجه به حداکثر دمای مورد نیاز در محفظه خشک کن (80°C)، دبی بیشینه و ویژگی های هوای محیط، انرژی مورد نیاز دستگاه $3991/6\text{ W}$ محاسبه شد که برای تامین این میزان انرژی ۴ عدد المنت ۱ کیلوواتی بکارگرفته شد. به منظور عملکرد بهینه کوره و جلوگیری از اتلاف انرژی المنت ها در یک محفظه که بطور کامل بوسیله پشم سنگ عایق بندی گردید قرار داده شدند.

۶-۲ فرآیند سیال سازی

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات، پارامتر های موثر در سیال سازی بستر مواد عبارتند از :
۱- ارتفاع بستر مواد ۲- دمای هوای ورودی به محفظه خشک کن ۳- سرعت هوای ورودی به محفظه خشک کن ۴- رطوبت اولیه دانه ها
حال به بررسی پارامتر های فوق در شرایط مختلف می پردازیم:

۶-۲-۱ افت فشار صفحه توزیع کننده

روابط پیشنهاد شده برای تعیین افت فشار توزیع کننده نشان دهنده رابطه مستقیم افت فشار با ارتفاع بستر مواد می باشد. در حالیکه منحنی های افت فشار صفحه توزیع کننده حاصل از آزمایش نشان دهنده مستقل بودن افت فشار از ارتفاع بستر می باشد. با مقایسه روابط تئوری ارائه شده با منحنی های حاصل، مقادیر بدست آمده از رابطه کریزی و کورشی در سرعت های پایین ($U < 1/2\text{ m/s}$) تطابق نسبتاً خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد.

با توجه با منحنی های شکل ۵-۲ مشاهده می شود که با افزایش دمای هوای ورودی میزان افت فشار توزیع کننده نیز افزایش می یابد. روابط پیشنهاد شده نیز این امر را تصدیق می کنند.

۶-۲-۲ افت فشار بستر مواد

با توجه به منحنی های سیال سازی شکل ۵-۵ مشاهده می شود که با افزایش عمق بستر مواد افت فشار مربوطه نیز افزایش می یابد. روابط پیشنهاد شده نیز این امر را تصدیق می کنند. مقایسه مقادیر حاصل از آزمایش و مقادیر بدست آمده از روابط نشان می دهد که منحنی افت فشار بدست آمده از رابطه کوزنی-کارمن در شرایط بستر ثابت تطابق نسبتا خوبی با منحنی های حاصل از آزمایش دارند. همچنین با افزایش دمای هوای ورودی به محفظه خشک کن افت فشار بستر مواد نیز افزایش می یابد(شکل ۵-۱۱).

با رسم منحنی سیال سازی بی بعد مشاهده می شود که بطور کلی با افزایش عدد رینولدز ضریب درگ دانه های شلتوک کاهش می یابد. همچنین افزایش دمای هوای ورودی موجب افزایش شیب منحنی های بی بعد سیال سازی می گردد.

می توان گفت با افزایش ارتفاع بستر مواد، نرخ تغییرات افت فشار با افزایش دما، افزایش می یابد (شکل ۵-۱۴).

بطور کلی افزایش رطوبت اولیه مواد موجب افزایش افت فشار بستر مواد می گردد. می توان گفت مرحله بستر ثابت تقریبا مستقل از رطوبت اولیه دانه ها می باشد اما با افزایش سرعت و شروع سیال سازی، افزایش رطوبت اولیه موجب افزایش افت فشار بستر می گردد.

۶-۲-۳ سرعت حداقل سیال سازی

کمینه سرعت سیال سازی مستقل از ارتفاع بستر سیال می باشد و تقریبا مقدار ثابتی دارد که به خصوصیات سیال ورودی و دانه های شلتوک وابسته است. نتایج حاصل از آزمایش تطابق خوبی را با مقادیر بدست آمده از رابطه Todes و Acrov نشان می دهد.

افزایش دمای هوای ورودی موجب افزایش سرعت حداقل سیال سازی می گردد زیرا با افزایش دما چگالی و لزجت سیال افزایش می یابد.

۳-۶ سینتیک خشک کردن

با افزایش ارتفاع بستر شیب منحنی خشک کردن کاهش یافته، در نتیجه زمان خشک کردن افزایش می یابد. اما با افزایش سرعت هوای ورودی و تغییر از مرحله بستر ثابت با بستر سیال شیب منحنی افزایش یافته و مدت زمان خشک کردن کاهش می یابد. مدت زمان لازم برای کاهش محتوای رطوبت شلتوک از رطوبت اولیه ۳۳/۲۵ به ۲۳٪ بر پایه خشک (۴۰٪ کاهش رطوبت) در ارتفاع بستر ۰/۰۷ m در شرایط بستر ثابت و سیال به ترتیب ۳۳ و ۲۲ دقیقه بدست آمد.

نرخ خشک کردن با افزایش ارتفاع بستر مواد کاهش می یابد. همچنین در شرایط بستر سیال شیب منحنی نرخ خشک کردن بیشتر از منحنی مربوط به شرایط بستر ثابت می باشد که نشان دهنده بیشتر بودن شدت خشک کردن در شرایط بستر سیال می باشد.

با رسم منحنی های بی بعد سینتیک خشک کردن مشاهده می شود با افزایش عدد فوریه میزان رطوبت کاهش می یابد.

مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر نشام می دهد که با افزایش ارتفاع بستر یکنواختی فرآیند خشک کردن کاهش می یابد. منحنی های اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی محفظه خشک کن نشان می دهد که با افزایش ارتفاع بستر این اختلاف افزایش می یابد. مقایسه این منحنی در شرایط بستر ثابت و سیال نشان دهنده کاهش اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی می باشد.

با افزایش دمای هوای خشک کننده، شیب منحنی خشک کردن بیشتر می شود و به این ترتیب مدت زمان خشک کردن کاهش می یابد.

مقایسه محتوای رطوبت کف و سطح بستر در دماهای مختلف نشان می دهد که در شرایط بستر ثابت با افزایش دمای هموی ورودی فرآیند خشک کردن غیر یکنواخت تر انجام می شود.

بطور کلی با افزایش سرعت هوای ورودی شیب منحنی خشک کردن افزایش و در نتیجه مدت زمان خشک کردن کاهش می یابد. بکارگیری سرعت های بالای هوای ورودی موجب افزایش ترک خوردگی دانه ها می شود، از این جهت محدودیتی در افزایش سرعت هوای ورودی به محفظه وجود دارد.

مدت زمان خشک کردن دانه ها با افزایش رطوبت اولیه آنها افزایش می یابد. این زمان در حالت بستر سیال کمتر از حالت بستر ثابت می باشد. همچنین با افزایش رطوبت اولیه دانه ها یکنواختی خشک کردن کاهش می یابد. به این ترتیب استفاده از مراحل پیش خشک کردن برای کاهش اولیه محتوای رطوبت دانه ها موثر می باشد.

۴-۶ پیشنهادات

بمنظور بهبود عملکرد دستگاه، فرآیند خشک کردن و تحقیق انجام شده مطالب زیر به عنوان افق های آینده پژوهش در زمینه خشک کردن به روش بستر سیال پیشنهاد می شود:

۱- مدل سازی عددی انتقال حرارت و جرم در سیستم بستر سیال برای شلتوک برنج و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده

۲- بررسی کیفی خشک کردن محصولات دانه ای از لحاظ ترک دانه، ارزش غذایی و ... و تعیین محدودیت های عملیاتی خشک کن با توجه به این ویژگی ها

۳- بررسی بازده حرارتی خشک کردن بستر سیال و مقایسه آن با شرایط بستر ثابت

۴- امکان سنجی بکارگیری منابع دیگر انرژی مانند انرژی خورشیدی بمنظور تامین حرارت مورد نیاز خشک کن و بررسی تاثیر آن بر پارامتر های خشک کردن

۵- بهینه سازی فرآیند انتقال انرژی با استفاده از بازیافت هوای گرم خروجی از محفظه خشک کن

۶- امکان بکارگیری خشک کن در مقیاس صنعتی و در شرایط محیطی واقعی

مراجع

[1] www.berenge.com

[۲] ر. سکوتی فر، سیمای صنعت برنج، ۱۳۸۴

[۳] سزلا استرامیلو، تادیوز کودرا، حسین پهلوان زاده (مترجم)، خشک کردن، اصول، کاربرد و

طراحی، ۱۳۷۷

[۴] پاپیس، جایاس، سنکوکسی، علی زمردیان (مترجم)، خشک کردن دانه ها (اصول نظری و

عملی)، نشر علوم کشاورزی، چاپ دوم، ۱۳۸۷

[5] Inaba H., S. Husain, A. Horibe and N. Haruki, Heat and Mass Transfer Analysis of Fluidized Bed Grain Drying, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, Vol.41, pp.52-62, January, 2007

[6] Carman, P.C. Trans. Inst. Chem. Eng. Jap., 1937

[7] Romankov P.G., and N.B. Rashkovskaya, Drying in Suspension State, Leningrad, Khimiya, Russia, 1979

[8] Quereshi E.A., and D.E. Creasy, Powder Technology, 1979

[9] Acrov M. and O.M. Todes, Hydrodynamic and Heat transfer Principles of Apparatus with Fixed and Fluidized beds, Khimiya, Leningrad, 1968

[10] Arai N. and S.J Sugiyama, Chem. Eng. Jap., 1974

[11] Hajidavallo E. and F. Hamdullahpur, Mathematical Modeling of Simultaneous Heat and Mass Transfer in Fluidized Bed Drying of Large Particles, Transaction of CSME, 1999, 23(1B): 129-145

[12] Soponronnarit S., A. Pongtornkulpanich and S. Prachayawarakorn, Drying Characteristics of Corn in Fluidized Bed Dryer, Drying Technology, 1997, 15(5): 1603-1615

[13] Dimattia D.G., P.R. Amyotte and F. Hamdullahpur, Fluidized Bed Drying of Large Particles, Transaction of the ASAE, 1996, 39(5): 1745-1750

[14] Prasad B.V.S., P.K. Chandra and S. Bal, Drying Parboiled Rough Rice in Stationary, Semi-fluidized and Fluidized Conditions, Transactions of the ASAE, 1994, 37(2): 589-594

[15] Magampon M.T.C. and A.K. Elpano, A Laboratory Study of Fluidized Bed Dryer of High Moisture Paddy, Phillipne Agricultural Machanization Bulletin, 1993, 1(4): 15-19

- [16] Nagahiro J., K. Higuchi and Y. Vatanabe, Studied on Drum Type Fluidized Bed Dryer for Grain (part 1), Journal of Japanes Society of Agricultural Machinery, 1992, 54(6): 57-64
- [17] Sutherland J.W. and T.F. Ghaly, Rapid Fluid Bed Drying of Paddy Rice in the Humid Tropics, Proceedings of ASAEN Seminar on Postharvest Technology, Brunei Darussalam, 1990, 19-30
- [18] Uckan G. and S. Ulku, Drying of Grains in a Batch Fluidized Bed Dryer, Drying of Solids, 1986, 14: 13-20
- [19] Golubkovich A.V. and A.G. Chizhikov, Substation of the Equipment for Preliminary Drying and Predrying og High Moisture Grain, Trudy VIM, 1980, 86: 36-45
- [20] Kunni D. and O. Levenspiel, Fluidization Engineering, Stoneham: Butterworth-Heinemann, USA, 1991
- [21] Saxena S.C. and G.J. Vogel Trans. Inst. Chem. Eng., 1977
- [22] Wen C.Y. and Y.H. Yu, A.I.Ch. Journal, 1966
- [23] Groshko V.D., R.B. Rozenbaum and O.M. Todes, O.M.Izu MVO SSSR, Nef I gaz No.1.125, 1958
- [24] Pinchbeck P.H. and F. Popper , Chem. Eng. Sci., 1956
- [25] Olevskii V.A, Zh. P. Kh., 1955
- [26] Mowla D. and M. Izadifar, Simulation of a Cross-flow Continuous Fluidized Bed Dryer for Paddy Rice, Journal of Food Engineering 58 (2003) 325–329, 2002
- [27] Brauer H. and D. Mewes, Design of Fluid Bed Drier, Chemical Industrial Technology, 1972
- [28] Davidson J.F. and D. Harrison, Fluidised Particles, Cumbridge: Cambridge University Press, Great Britain, 1963
- [29] امیری چایجان، ر. خ.ش تقاضا، اصول طراحی یک خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی برای برخی محصولات دانه ای زراعی، پایان نامه کارشناسی ارشد، تربیت مدرس، ۱۳۷۹
- [30] ASAE (2000), ASAE Standard 47th edn, St. Jouseph, Mi: USA

پیوست ها

پیوست ۱

محدوده ابعاد برخی از دانه ها [۴]

Seeds	Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Reference
Barley	—	2.7-4.2	7.5-10.5	Jayas (1994)
Barley	1.5-4.5	2.0-5.0	7.0-15.0	Grochowicz (1971)
Beans	2.5-10.0	4.5-11.0	7.0-18.5	Grochowicz (1971)
Canola	—	1.0-2.1	1.1-2.5	Jayas (1994)
Clover, red	0.6-1.4	1.0-2.0	1.2-2.7	Grochowicz (1971)
Clover, white	0.4-1.1	0.8-1.4	0.8-1.8	Grochowicz (1971)
Corn, shelled	4.4-5.4	8.7-10.6	9.8-12.1	Mühlbauer (1974)
Corn, shelled	3.6-4.6	7.2-8.8	11.6-13.6	Nelson (1980)
Durum	—	2.2-4.2	6.0-9.0	Jayas (1994)
Millet	1.1-2.2	1.2-3.0	1.8-3.2	Grochowicz (1971)
Oats	1.2-4.0	1.4-4.0	8.0-18.5	Grochowicz (1971)
Oats	—	2.2-3.6	7.0-14.0	Jayas (1994)
Peas	2.0-10.0	3.0-10.0	4.5-10.0	Grochowicz (1971)
Rice, long (unhulled)	1.8-2.0	2.3-2.5	8.7-9.9	Webb (1991)
Rye	0.4-0.8	0.6-1.0	2.5-3.5	Grochowicz (1971)
Rye	—	1.9-3.2	5.5-9.5	Jayas (1994)
Vetch	2.0-5.5	3.2-6.5	3.2-7.5	Grochowicz (1971)
Wheat	1.4-3.8	1.7-4.0	4.2-8.6	Grochowicz (1971)
Wheat, hard red spring	—	2.6-4.0	5.0-8.0	Jayas (1994)

پیوست ۲

معادلات برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی برخی از دانه های غلات [۴]

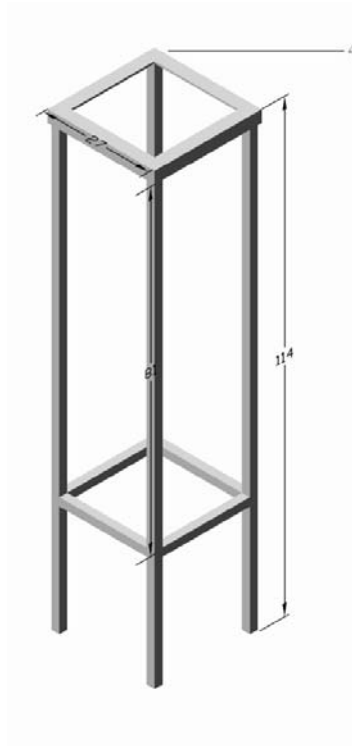
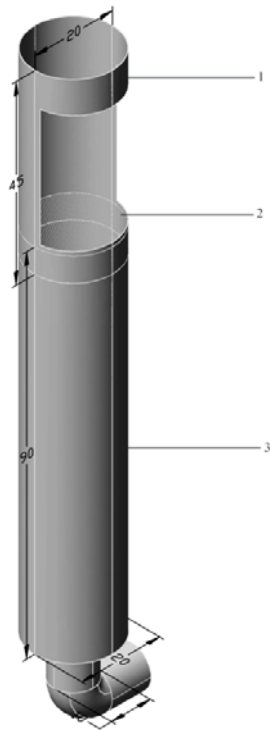
Crop	Equations* ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Range ^b	Reference
Barley	$k = 0.1153 + 0.217M$	$0 \leq M \leq 0.25$	Gadaj and Cybulska (1973)
Barley (2 row) Harrington	$k = 0.173 - 7.51 \times 10^{-4}t + 1.51 \times 10^{-3}M^2$	$9 \leq M \leq 23\%$ $-28 \leq t \leq 29^\circ C$	Alagusundaram et al. (1991)
Beans	$k = 0.1360 + 0.036M$	$0 \leq M \leq 0.3$	Pabis et al. (1970)
Kidney beans	$k = 0.0671 + 32.84M$	$0.115 \leq M \leq 0.414$	Zuritz et al. (1989)
Corn	$k = 0.1409 + 0.0011M^2$	$0.9 \leq M \leq 30.2\%$	Kazarian and Hall (1965)
Corn	$k = 0.1580 + 0.42M$	$0 \leq M \leq 0.3$	Pabis et al. (1970)
Corn	$k = 0.1326 + 0.1547M - 0.1454M^2$	$0 \leq M \leq 0.6$	Mühlbauer (1974)
Fava beans	$k = 0.1400 + 0.037M$	$0 \leq M \leq 0.3$	Pabis et al. (1970)
Gram (Chickpeas)	$k = -5.07 \times 10^{-1} + 2.55 \times 10^{-2}T$ $-2.13 \times 10^{-6}T^2 + 4.24 \times 10^{-1}M$ $-6.56 \times 10^{-3}M^2 + 6.48 \times 10^{-4}MT$	$283 \leq T \leq 312 K$ $0.115 \leq M \leq 0.272$	Dutta et al. (1988)
Lentils, Laird	$k = 0.193 + 1.0 \times 10^{-2}t + 1.51 \times 10^{-3}M^2$	$9 \leq M \leq 23\%$ $-28 \leq t \leq 29^\circ C$	Alagusundaram et al. (1991)
Oats	$k = 0.0988 + 0.307M$	$0 \leq M \leq 0.19$	Gadaj and Cybulska (1973)
Peas	$k = 0.1290 + 0.034M$	$0 \leq M \leq 0.3$	Pabis et al. (1970)
Peas, Trapper	$k = 0.168 + 8.4 \times 10^{-4}t + 3.05 \times 10^{-3}M^2$	$9 \leq M \leq 23\%$ $-28 \leq t \leq 29^\circ C$	Alagusundaram et al. (1991)
Rapeseed	$k = 0.1600 + 0.043M$	$0 \leq M \leq 0.30$	Pabis et al. (1970)
Rice, unshelled	$k = 0.0865 + 0.0013M^2$	$9.9 \leq M \leq 19.3\%$	Wratten et al. (1959)
Rice bran	$k = -0.0943 + 3.87 \times 10^{-3}M^2 + 6.19 \times 10^{-4}t$ $+ 3.14 \times 10^{-4}\rho_p$	$7 \leq M \leq 15\%$ $410 \leq \rho_p \leq 490 kg/m^3$ $42 \leq t \leq 68^\circ C$	Sreenarayanan and Chattopadhyay (1986)
Rye	$k = 0.1163 + 0.219M$	$0 \leq M \leq 0.21$	Gadaj and Cybulska (1973)
Sorghum	$k = 0.0976 + 0.0015M$	$0 \leq M \leq 25\%$	Sharma and Thompson (1973)
Wheat, HRS	$k = 0.1398 + 0.0014M^2$ for $t = 20^\circ C$ $k = 0.1440 + 0.0009M^2$ for $t = 5^\circ C$ $k = 0.1365 + 0.0014M^2$ for $t = 1^\circ C$ $k = 0.1327 + 0.0015M^2$ for $t = -6^\circ C$ $k = 0.1407 + 0.0009M^2$ for $t = -17^\circ C$ $k = 0.1436 + 0.0009M^2$ for $t = -27^\circ C$	$4.4 \leq M \leq 22.5\%$	Chandra and Muir (1971)
Wheat	$k = 0.1170 + 0.0011M^2$	$0.7 \leq M \leq 20.3\%$	Kazarian and Hall (1965)
Wheat	$k = 0.1337 + 0.252M$	$0.05 \leq M \leq 0.22$	Gadaj and Cybulska (1973)

*k = thermal conductivity $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

^bM = moisture content, $kg H_2O/kg dm$; M = moisture content, % wb.

پیوست ۳

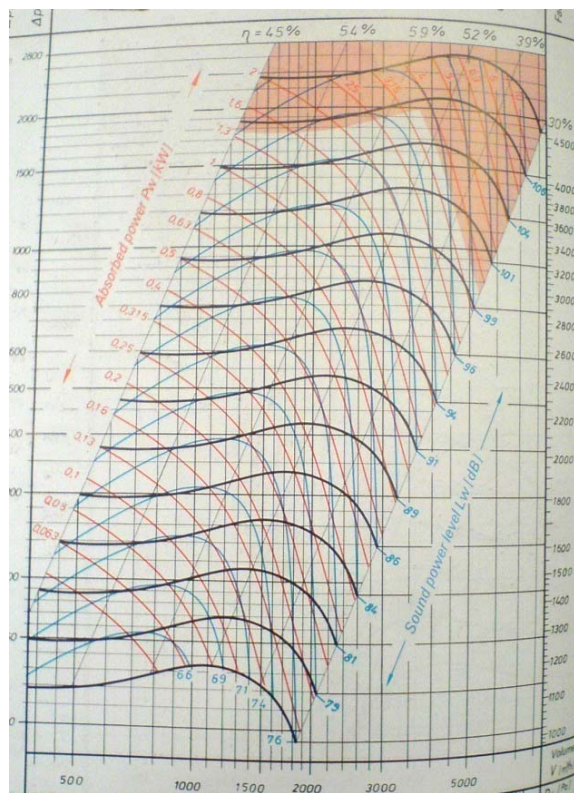
نمای اجزاء ساختمان دستگاه و تجهیزات



- ۱- محفظه خشک کن
- ۲- صفحه توزیع کننده
- ۳- محفظه یکنواخت کننده هوا
- ۴- شاسی
- ۵- کوره حرارتی
- ۶- دمنده
- ۷- فشار سنج تفاضلی



دمنده



منحنی عملکرد فن انتخاب شده

مشخصات موتور مربوطه

شرکت سازنده	دور موتور	توان	مدل	موتور
ELMA MOTORS CO LTD	۲۷۶۰ U/min	۰/۵۵/۰/۷۵ kW/HP	T 71B/2D	موتور



نمای کوره حرارتی و المنت ها

پیوست ۴

تجهيزات آزمایشگاهی



دماسنج دیجیتالی



سرعت سنج دیجیتالی پروانه ای



اجاق F.A.G



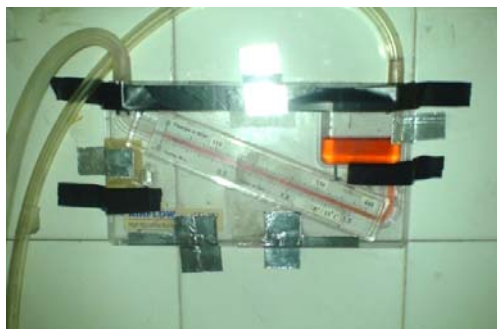
ترازوی CAS مدل SC-05P ساخت کشور آلمان



ترازوی SARTORIUS مدل PT 210



ترازوی METTLER مدل AE 200



شرایط عملکرد	جرم حجمی نسبی	شرکت سازنده	نام
۱۵ °C	۰/۸۷	KIMO	AWS 10

مانومتر تفاضلی و ویژگی های مایع درون آن

محدوده و خطای اندازه گیری تجهیزات

خطای اندازه گیری	دقت اندازه گیری	محدوده اندازه گیری	تجهیزات
±%۰/۱۴	۰/۱ °C	۱۰-۸۰ °C	دماسنج دیجیتالی
±%۰/۵۹	۰/۱ m/s	۰-۱۷ m/s	سرعت سنج دیجیتالی
±%۱/۳	۰/۰۲ In W.G.	۰-۱/۵۴ In W.G.	مانومتر تفاضلی
±%۰/۰۳	۱ gr	۰-۳ kg	ترازوی SC-05P-CAS
±%۰/۶۶×۱۰-۳	۱۰-۴ gr	۰-۱۵ gr	ترازوی METTLER
±%۰/۰۶	۱۰-۲ gr	۰-۱۵ gr	ترازوی SARTORIUS

پیوست ۵

ویژگی های فیزیکی دانه شلتوک

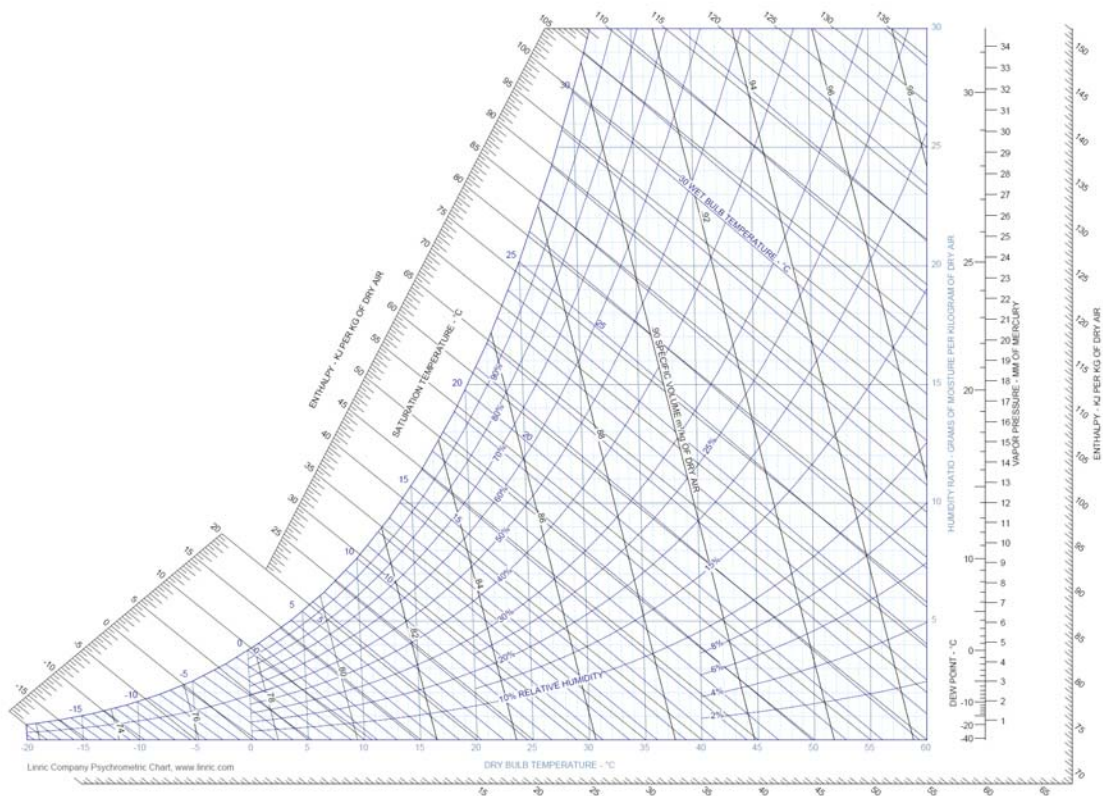
جرم حجمی توده	جرم حجمی ذره	تخلخل دینامیک	تخلخل استاتیک	کرویت	قطر معادل
۴۸۷/۹۰ kg/m ³	۹۲۵/۲۷ kg/m ³	۰/۵۴	۰/۴۷۳	۰/۳۷۶۵	۰/۰۰۳۷m

پیوست ۶

استاندارد تعیین میزان رطوبت [۳۰]

میزان نمونه	زمان	دما	شلتوک
۱۰ g	۲۴ ساعت	۱۳۰ °C	

پیوست ۷



نمودار سایکرومتریک

پیوست ۸



مرحله بستر ثابت

پیوست ۹



ستون های ناشی از حرکت حباب های هوا که به صورت تصادفی در نقاط مختلف بستر ایجاد می شوند

پیوست ۱۰



مرحله بستر سیال

Abstract

Drying is an important operation in many industries such as chemical, food, metallurgical, pharmaceutical and etc. Fluidized bed drying is considered as one of the most successful drying techniques. The advantages of fluidized bed drying can be summarized as follows:

1. High heat and mass transfer rates, because of good contact between the particles and the drying gas.
2. Uniform temperature and bulk moisture content of particles, because of intensive particle mixing in the bed.
3. Excellent temperature control and operation up to the highest temperature.

Paddy is one of the grains that are needed to be dried after harvesting. In order to investigate the influences of effective parameters in fluidized bed drying of paddy rice, a laboratory scaled fluidized bed dryer designed and constructed to obtain experimental data. The fluidization column was made of Aluminum with 0.2 m inner diameter, 0.45 m height and 0.001 m wall thickness. A perforated distributor plate with 0.001 m thickness and 0.003 m holes was used to obtain uniform distribution of the fluidizing air. The air heater consists of four strip electric elements, which has 4000 W total power. The air was provided by a centrifugal blower. The temperature distribution through the bed was measured by an electronic thermometer. The pressure difference between the two sides of distributor plate and the distributor plate and fluidized bed height was measured with a differential manometer. Air velocity was measured and determined with an electric anemometer. Drying conditions were as follows: drying air temperature of 21–80 °C, bed thickness of 0.04-0.08 m and air velocity of 0.8, 1.85 and 2.7 m/s in fixed bed, minimum fluidization and fluidized bed situation, initial moisture content of paddy 35.21%, 38.25%, 39.07%, 43.3% , 43.92%.

Experimental data shows that increasing the bed thickness cause the pressure drop of the bed to be increased. But the minimum fluidization velocity is independent from bed thickness. Also increasing the temperature of drying air allows the pressure drop and minimum fluidization velocity to be increased.

According to experimental data, bed thickness, Drying air velocity, temperature of drying air and initial moisture content of paddy kernels have an important effects on the kinetics of drying. Increasing the velocity and temperature of the drying air allows the rate of heat transfer to the product to be increased. instead, the rate of drying decrease with increasing the bed thickness and initial moisture content of kernels.

Key words: Fluidized bed Dryer, Minimum fluidization velocity, pressure drop, paddy



Shahrood University of Technology

Mechanical engineering Faculty

Experimental Investigaion of a Fluidized Bed Dryer of Paddy

M.A. Vosadi

**Supervisor(s):
Dr. Hashemi Marghzar
Dr. Farzaneh**

July 2009