

اصول طراحی و ساخت یک خشک کن بستر شناور ارتعاشی

آزمایشگاهی جهت مطالعه شناورسازی مواد مرطوب

مرتضی صادقی

دانشجوی دکتری

محمدهادی خوش تقاضا

استادیار

گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

امیر علی اکبر خیاط

استادیار

دانشکده مهندسی هوا و فضا، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

به منظور مطالعه اثر ارتعاش بر رفتار شناورسازی مواد با رطوبت بالا و حل برخی از مشکلات موجود در خشک کن‌های بستر شناور، یک خشک کن بستر شناور ارتعاشی آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. انتخاب دمنده بر اساس سرعت انتقال مواد و افت فشار ناشی از بستر مواد بعلاوه افت فشار ناشی از جریان هوا در کانال‌ها صورت پذیرفت. دمنده انتخاب شده از نوع سانتریفیوژ با پره‌های عقب‌گرد و مشخصات فشار استاتیک $3/5$ کیلوپاسکال، دبی $0/4$ متر مکعب بر ثانیه و قطر پروانه $0/4$ متر بود. خشک کن با کوره حرارتی به ظرفیت $4/9$ کیلووات متشکل از 11 المان الکتریکی، صفحه توزیع کننده با قطر سوراخ‌های 1 میلی‌متر و تعداد 140625 سوراخ در واحد سطح (متر مربع) و محفظه خشک کن از جنس پلکسی گلاس و به ابعاد سطح مقطع $0/16 \times 0/16$ متر و ارتفاع $0/5$ متر ساخته شد. مرتعش نمودن بستر مواد، با استفاده از یک مکانیزم مکانیکی با قابلیت تنظیم دامنه ارتعاش ($0-5$ میلی‌متر) و فرکانس ($10-1$ هرتز) صورت پذیرفت. به منظور کنترل دبی و درجه حرارت هوای ورودی به محفظه، از یک سیستم کنترل خودکار رایانه‌ای استفاده شد. به منظور بررسی عملکرد دستگاه از نظر کیفیت شناورسازی، آزمایشات آیرودینامیک بستر بر روی ذرات چای سیاه انجام شد. آزمایشات انجام شده، بیانگر تأثیر مثبت ارتعاش بر کیفیت شناورسازی ذرات چای بوده است. بطوریکه در وضعیت بستر شناور ارتعاشی (فرکانس 10 هرتز و دامنه 1 میلی‌متر) پدیده پس‌ماند در منحنی افت فشار-سرعت هوا و همچنین کانالیزه شدن بستر مشاهده نمی‌شد. حداقل سرعت شناوری نیز در این وضعیت در مقایسه با بستر شناور معمولی از $0/762$ متر بر ثانیه به $0/5334$ متر بر ثانیه کاهش پیدا می‌کرد.

کلمات کلیدی

طراحی، ساخت، ارتعاش، خشک کن بستر شناور، سیستم کنترل رایانه‌ای، آیرودینامیک بستر، چای

Principles of Designing and Fabricating of a Laboratory Vibro-fluidized Bed Dryer to Study of Moist Materials Fluidization

M. Sadeghi

Ph.D. student

Tarbiat Modarres University

M.H. Khoshtaghaza

Assistant Professor

Tarbiat Modarres University

A. A. A. Khayyat

Assistant Professor

Sharif University of Technology

Abstract

To study of vibration effect on fluidization behaviour of high moisture materials, a laboratory vibro-fluidized bed dryer was designed and fabricated. The blower was selected based on transferring velocity of particles and pressure drop caused by airflow through the bedplate and the channels. It was centrifugal type with backward blades, static pressure of 3.5 kPa, flow rate of 0.4 m³/s and impeller diameter of 0.4 m. The dryer was constructed with 4.9 kW electrical heater capacity, bed plate with holes diameter of 1 mm and 140626 holes/m². The dryer chamber was made of Plexiglass with 0.16×0.16 m square section and 0.5 m height. The bedplate was vibrated mechanically, which was adjustable for amplitude (0-5 mm) and frequency (0-10 Hz). An automatic control system was utilized to control inlet air temperature and airflow rate. To evaluate the fluidization quality of the dryer, bed aerodynamic experiments were conducted on moist black tea particles. The result showed that at vibro-fluidized condition (frequency of 10 Hz and amplitude of 1 mm), there was no hysteresis in pressure drop vs. air velocity curve. Also channeling of bed was not observed in this case and minimum fluidization velocity was decreased from 0.762 to 0.5334 m/s in comparison with ordinary fluidized case. Therefore, there was a positive effect on fluidization quality of tea particles.

Keywords

Design, Fabricate, Vibration, Fluid Bed Dryer, Bed Aerodynamic, Tea

مقدمه

در میان روش‌های جدید خشک کردن محصولات کشاورزی، روش بستر شناور از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۱]. شناورسازی پدیده‌ای است که بوسیله آن ذرات جامد در هوا معلق می‌شوند و شبیه سیال عمل می‌کنند. هنگامی که یک سیال از میان ذرات یک بستر به سمت بالا جریان پیدا می‌کند، در دبی پائین، سیال فقط از فضای خالی میان ذرات ثابت عبور می‌کند. در این حالت بستر ذرات را بستر ثابت^۱ می‌نامند. با افزایش سرعت سیال، به نقطه‌ای می‌رسیم که نیروهای پُسای^۲ اعمال شده بر ذرات از طرف سیال با وزن ذرات برابر می‌شوند. در این وضعیت ذرات بستر از یکدیگر مقداری فاصله گرفته و اندکی مرتعش می‌شوند، بطوری که بستر ذرات درست در نقطه شناور شدن قرار می‌گیرد. این وضعیت حداقل شناوری^۳ نامیده می‌شود. با افزایش بیشتر دبی جریان پس از حالت حداقل شناوری، ذرات بصورت کامل به حرکت درآمده و با یکدیگر مخلوط می‌شوند. از فوائد این روش می‌توان به اختلاط مناسب و انتقال آسان ذرات، یکنواختی انتقال جرم و حرارت در بستر و همچنین نرخ بالای انتقال حرارت و جرم میان گاز و ذرات اشاره کرد [۱۰]. مزایای روش بستر شناور باعث شده است که از آن در صنایع مختلف شیمیایی، دارویی و معدنی استفاده شود. کاربرد این روش در زمینه کشاورزی نیز طی چند سال اخیر مورد بررسی قرار گرفته است.

علیرغم مزایای اشاره شده، روش بستر شناور مشکلاتی را نیز به همراه دارد که از مهمترین آنها می‌توان کانالیزه شدن^۴ بستر مواد و خارج شدن بستر از حالت شناوری^۵ را نام برد. این مشکلات به خصوص در مورد محصولات با رطوبت بالا، مواد نامنظم از نظر شکل و همچنین ذرات گروه C بر اساس طبقه‌بندی Geldart (ذرات چسبنده با اندازه کمتر از ۲۰ میکرون)، بیشتر به چشم می‌خورد. کاربرد ارتعاش می‌تواند بعنوان یک استراتژی برای بهبود کیفیت شناورسازی این نوع مواد و غلبه بر مشکلات مذکور بکار رود. در سال ۱۹۸۵ طی تحقیقی گزارش شد که ارتعاش می‌تواند برای نگهداری ذرات در یک وضعیت متحرک بکار رود [۱۷]. آنها همچنین کاربرد مؤثر این روش را برای مواد چسبنده، موادی که به سختی به حالت تعلیق در می‌آیند و همچنین مواد با توزیع وسیع اندازه ذرات گزارش کردند. مطالعات گسترده‌ای بر روی تنوع وسیعی از محصولات شیمیایی، معدنی، سرامیکی، پلاستیکی و غذایی صورت پذیرفته است. بعضی از مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی و برخی دیگر در مقیاس صنعتی و نیمه صنعتی انجام شده‌اند [۳، ۷، ۱۳، ۱۸].

در این تحقیق، اصول طراحی و ساخت خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی در مقیاس آزمایشگاهی با قابلیت کنترل درجه حرارت و دبی هوای ورودی به محفظه، ارائه خواهد شد. با استفاده از این دستگاه اثرات ارتعاش در شناورسازی مواد مرطوب، طی آزمایشاتی در زمینه آیرودینامیک بستر ذرات چای با رطوبت بالا مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

۱- طراحی خشک کن بستر شناور

شکل ۱، طرح کلی و اجزاء اصلی خشک کن بستر شناور ارتعاشی ساخته شده را به صورت سه بعدی نشان می‌دهد.

۱-۱- طراحی قسمت‌های مکانیکی خشک کن

به منظور طراحی قسمت‌های مکانیکی دستگاه مورد نظر، ابتدا پارامترهایی که در طراحی دستگاه نقش داشتند تعیین و محاسبه شدند. این پارامترها عبارت بودند از: خواص فیزیکی محصول شامل شکل و اندازه ذرات، جرم حجمی و تخلخل ذرات تشکیل دهنده بستر و همچنین خواص شناورسازی از قبیل حداقل سرعت شناوری، سرعت انتقال مواد، افت فشار ناشی از بستر مواد و افت فشار جریان هوا. محاسبات انجام گرفته بر اساس محصول چای سیاه صورت گرفت. در طراحی و ساخت قسمت‌های مختلف، قابلیت تعویض اجزاء و قطعات مختلف به منظور استفاده برای محصولات دیگر مانند گیاهان دارویی و همچنین قابلیت تغییر و تنظیم دقیق عوامل مهم مانند دبی و دمای هوای ورودی، عمق بستر مواد و دامنه و فرکانس ارتعاشات در نظر گرفته شد.

الف - تخلخل بستر

با توجه به خواص فیزیکی محصول، تخلخل بستر در شرایط استاتیکی (بستر ثابت) از رابطه زیر بدست آمد [۴]:

$$\varepsilon_{st} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (1)$$

که ρ_b جرم حجمی توده^۶ بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، ρ_p جرم حجمی ذره^۷ بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و ε_{st} تخلخل استاتیک (بدون بعد) است. برای چای، ρ_b برابر ۳۶۷ کیلوگرم بر متر مکعب و ρ_p برابر ۱۳۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش شده است [۹]. برای محاسبه تخلخل بستر در حالت حداقل شناوری، نیاز بود تا ارتفاع بستر در این حالت، به ازاء ارتفاع اولیه بستر اندازه‌گیری شود. روش‌های محاسبه ارتفاع بستر بر اساس معادلات انتقال جرم و مقادیر ضرایب انتقال جرم، ارتفاع کمی را برای بستر بدست می‌دهند (مثلاً برای ذراتی با قطر ۰/۱ تا ۱/۵ میلی‌متر، ارتفاع بستر ۷ تا ۳۰ میلی‌متر محاسبه می‌شود). در عمل، بکار بردن چنین بسترهای کم ارتفاعی مشکل است. زیرا با مشکلاتی نظیر برقرار کردن جریان یکنواخت ماده و گاز در خشک کن روبرو خواهیم شد. بنابراین در عمل از روش‌های تقریبی برای محاسبه ارتفاع بستر استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها که جریان یکنواختی از ماده و گاز در محفظه را ایجاد می‌کند، ارتفاع بستر $80 d_{or}$ را در نظر می‌گیرد که d_{or} قطر سوراخ‌های صفحه توزیع کننده است [۱]. با توجه به مقدار محاسبه شده برای قطر سوراخ‌های توزیع کننده برابر ۱ میلی‌متر (در قسمت طراحی صفحه توزیع کننده توضیح داده شده است) و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۲۵، ارتفاع اولیه بستر ۰/۱ متر بدست آمد. سپس با انجام آزمایش اندازه‌گیری افت فشار بر حسب سرعت هوا، ارتفاع بستر در وضعیت حداقل شناوری برابر ۰/۱۰۵ متر بدست آمد. در نهایت تخلخل بستر در شرایط حداقل شناوری بصورت زیر محاسبه شد:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{H_{st}}{H_{mf}} (1 - \varepsilon_{st}) \quad (2)$$

که ε_{mf} تخلخل در حالت حداقل شناوری (بدون بعد)، H_{st} ارتفاع بستر در حالت استاتیک بر حسب متر و H_{mf} ارتفاع بستر در حالت حداقل شناوری بر حسب متر است. بنابراین تخلخل بستر در شرایط حداقل شناوری برابر ۰/۷۴۶ محاسبه شد.

ب - افت فشار بستر مواد و افت فشار جریان هوا

به منظور انتخاب دمنده دستگاه، لازم بود تا افت فشار بستر مواد محاسبه شود. شرایط حداقل شناوری زمانی رخ می‌دهد که برآیند نیروهای پسای اعمال شده بوسیله حرکت رو به بالای گاز برابر وزن ذرات باشد. این نیروی برآیند از حاصلضرب افت

فشار بستر مواد در مساحت مقطع محفظه به دست می‌آید. وزن ذرات نیز از حاصلضرب وزن حجمی ذرات در حجم بستر حاصل می‌گردد. با توجه به برابری این نیروها در شروع مرحله شناوری، رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$\frac{\Delta P_b}{H_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (3)$$

که ΔP_b افت فشار بستر مواد برحسب پاسکال، ρ_g جرم حجمی گاز برحسب کیلوگرم بر متر مکعب و g شتاب ثقل برحسب متر بر مجذور ثانیه است. با استفاده از مقادیر به دست آمده برای پارامترهای رابطه فوق (ε_{mf} برابر 0.746 ، ρ_p برابر 1380 کیلوگرم بر متر مکعب و ρ_g برابر با $1/06$ کیلوگرم بر متر مکعب)، افت فشار بستر مواد برابر $360/77$ پاسکال بدست آمد. برای انتخاب دمنده مناسب لازم بود علاوه بر افت فشار ناشی از ستون مواد، افت فشار ناشی از جریان هوا نیز محاسبه شود. با توجه به طرحواره مسیر جریان هوا تا زیر محفظه خشک‌کن که در شکل ۲ نشان داده شده است، افت فشار در هر یک از قسمت‌های ۱ تا ۶، بصورت زیر محاسبه شد [۲]:

$$\Delta P_g = k \times \rho_g \frac{u_g^2}{2} \quad (4)$$

در این رابطه ΔP_g افت فشار ناشی از جریان گاز برحسب پاسکال، u_g سرعت گاز برحسب متر بر ثانیه و k ضریب افت فشار (بدون بعد) است که به شکل هندسی کانال بستگی دارد و از جداول موجود بدست می‌آید. با استفاده از رابطه ۴، مجموع افت فشار ناشی از جریان هوا برای قسمت‌های ۱ تا ۶، برابر $310/03$ پاسکال بدست آمد. در نتیجه افت فشار کل سیستم برابر $670/8$ پاسکال بدست آمد.

پ - حداقل سرعت شناوری و سرعت انتقال مواد

محاسبه حداقل سرعت شناوری با استفاده از رابطه زیر صورت پذیرفت [۱۱]:

$$\left(\frac{\rho_g \times u_{g,mf} \times d_p}{\mu_g} \right) = \left[(28.7)^2 + 0.0494Ar \right]^{1/2} - 28.7 \quad (5)$$

که در آن، d_p قطر متوسط یا میانگین ذرات برحسب متر که در مورد چای برابر با 0.001195 متر است [۹]، $u_{g,mf}$ حداقل سرعت شناوری برحسب متر بر ثانیه، μ_g ویسکوزیته گاز برحسب نیوتن ثانیه بر متر مربع و Ar عدد ارشمیدس است که خود از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Ar = \frac{\rho_g \times g(\rho_p - \rho_g)d_p^3}{\mu_g^2} \quad (6)$$

هنگامی که سرعت گاز ورودی در حدی باشد که بتواند مواد موجود در بستر را از محفظه خارج کند، به آن سرعت انتقال^۸ مواد می‌گویند. در عمل بایستی سرعت گاز بین حداقل سرعت شناوری و سرعت انتقال باشد. محاسبه سرعت انتقال مواد نیز با استفاده از رابطه ۷ که ارتباط میان حداقل سرعت شناوری و سرعت انتقال مواد را برحسب عدد ارشمیدس بیان می‌کند، صورت گرفت [۱۱]:

$$\frac{u_{g,mf}}{u_{g,t}} = 0.1175 - \frac{0.1046}{1 + 0.00373 \times Ar^{0.6}} \quad (7)$$

در این رابطه $u_{g,t}$ سرعت انتقال مواد برحسب متر بر ثانیه است. با استفاده از روابط ۵ و ۷ مقادیر $u_{g,t}$ و $u_{g,mf}$ برای چای به ترتیب برابر ۰/۵۳۸ و ۵/۹۰۹ متر بر ثانیه محاسبه شد.

۱-۱-۱- انتخاب دمنده

یکی از روش‌های متداول برای انتخاب دمنده، استفاده از مفهوم سرعت ویژه^۹ است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$Ns = \frac{N \times \sqrt{Q}}{P^{\frac{3}{4}}} \quad (۸)$$

که N دور موتور برحسب دور در دقیقه، Q دبی هوا برحسب متر مکعب بر ثانیه، P فشار هوا برحسب پاسکال و Ns سرعت ویژه (بدون بعد) است. محدوده Ns برای دمنده‌های مختلف متفاوت است و به کمک جدول مربوط به انتخاب دمنده انجام می‌گیرد [۵]. با توجه به تلفات فشار و دبی هوای مورد نیاز، احتیاج به دمنده‌ای بود که حداقل بتواند دبی هوای مورد نیاز برای انتقال مواد را از یک سو و مجموع افت فشار برای حداقل شناور کردن ذرات چای و افت فشار ناشی از عبور جریان هوا از مسیر مورد نظر را از سوی دیگر تأمین کند. با توجه به خطاهای موجود در محاسبات و اندازه‌گیری، ضریب اطمینان ۲ برای افت فشار کل و دبی هوای مورد نیاز در نظر گرفته شد. از این رو افت فشار کل برابر ۱۳۴۱/۶ پاسکال و دبی هوا نیز برابر ۰/۳ متر مکعب بر ثانیه بدست آمد. از طرف دیگر با توجه به کاربرد این خشک‌کن آزمایشگاهی برای محصولات متنوع دیگر از قبیل گیاهان دارویی، زعفران و بطور کلی محصولات با رطوبت بالا، در انتخاب دمنده سعی شد از دمنده‌ای با فشار و دبی هوای بالاتر از مقادیر محاسبه شده استفاده شود و در نهایت دمنده سانتریفیوژ پراهی عقب‌گرد با قطر پروانه ۰/۴ متر، فشار استاتیک ۳/۵ کیلوپاسکال و دبی ۰/۴ متر مکعب بر ثانیه انتخاب شد. قدرت موتور محرک دمنده نیز از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Pw = Q \times P \quad (۹)$$

که Pw قدرت موتور برحسب وات، Q دبی هوا برحسب متر مکعب بر ثانیه و P فشار استاتیک برحسب پاسکال است. با توجه به رابطه بالا، موتوری سه فاز با توان ۱/۵ کیلووات و دور ثابت ۲۸۰۰ دور در دقیقه ساخت شرکت موتوژن انتخاب شد.

۱-۱-۲- طراحی صفحه توزیع کننده

به منظور طراحی صفحه توزیع کننده، از تئوری منفذ^{۱۱} استفاده شد که شامل مراحل زیر است [۱۱]:

- ۱- تعیین افت فشار در صفحه توزیع کننده (ΔP_d) که ۰/۲ تا ۰/۴ افت فشار بستر مواد است [۶].
- ۲- محاسبه عدد رینولدز منفذ، برای کل جریان قابل دسترس و در نهایت انتخاب ضریب منفذ (C_{or}) با استفاده از جدول ۱.
- ۳- تعیین سرعت گاز از میان منافذ با استفاده از رابطه ۱۰:

$$u_{or} = C_{or} \left(\frac{2 \times \Delta P_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (۱۰)$$

که u_{or} سرعت هوا از میان منافذ شبکه توزیع کننده برحسب متر بر ثانیه، C_{or} ضریب منفذ (بدون بعد) و ΔP_d افت فشار صفحه توزیع کننده برحسب پاسکال است. نسبت $\beta = u_g / u_{or}$ سطح آزادی^{۱۱} صفحه توزیع کننده را خواهد داد که معمولاً کمتر از ۱۰ درصد است.

۱- بازا، مقادیر مختلف قطر سوراخ‌های شبکه، تعداد سوراخ‌ها در واحد سطح صفحه توزیع کننده هوا با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$u_g = \frac{\pi}{4} (d_{or}^2 \times u_{or} \times n_{or}) \quad (۱۱)$$

که قطر سوراخ‌ها برحسب متر و n_{or} تعداد سوراخ‌ها در واحد سطح صفحه توزیع کننده است. با توجه به مشخصات انواع رایج صفحه‌های توزیع کننده هوا در خشک‌کن‌های چای [۲۰] و سطح آزادی محاسبه شده برابر با $۰/۴/۷۱$ ، صفحه‌ای با قطر سوراخ‌های ۱ میلی‌متر و تعداد ۱۴۰۶۲۵ سوراخ در واحد سطح (متر مربع) و از جنس استیل انتخاب شد. ضخامت صفحه نیز از رابطه زیر محاسبه شد [۲۱]:

$$\Delta P_d = 1.04 \left(\frac{d_{or}}{b} \right)^{0.25} \frac{u_{or}^2 \times \rho_g}{2} \quad (12)$$

در این رابطه b ضخامت توزیع کننده هوا برحسب متر است. با جایگذاری مقادیر مربوطه، مقدار ضخامت صفحه توزیع کننده $۰/۲$ میلی‌متر بدست آمد.

چون تغییر سرعت گاز در محدوده بین سرعت حداقل شناوری و سرعت انتقال مواد قرار دارد، سطح صفحه توزیع کننده مورد استفاده نیز در محدوده زیر قرار می‌گیرد:

$$\frac{W'}{\rho_g \times u_{g,t}} \leq S_d \leq \frac{W'}{\rho_g \times u_{g,mf}} \quad (13)$$

که W' دبی جرمی هوای خشک برحسب کیلوگرم بر ثانیه و S_d مساحت صفحه توزیع کننده برحسب متر مربع است. دبی جرمی هوای خشک از رابطه زیر محاسبه شد [۱۲]:

$$W' = \frac{\pi(D)^2}{4} \times \frac{u_g}{V'} \quad (14)$$

که D قطر پروانه دمنده برحسب متر و V' حجم ویژه^{۱۲} هوا برابر با $۰/۸$ متر مکعب بر کیلوگرم هوای خشک است. با توجه به قطر پروانه $۰/۴$ متر و سرعت هوای $۰/۵۳۸$ متر بر ثانیه، دبی جرمی هوای خشک برابر $۰/۰۸۵$ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمد. سپس با استفاده از رابطه ۱۳ مقدار متوسط سطح مقطع شبکه توزیع کننده هوا $۰/۰۲۵۷$ متر مربع محاسبه شد. با توجه به این سطح مقطع، صفحه‌ای به ابعاد $۰/۱۶ \times ۰/۱۶$ متر انتخاب شد.

۱-۱-۳- کوره حرارتی

طراحی کوره حرارتی با توجه به نیازهای حرارتی مورد نیاز برای خشک کردن محصول، شرایط محیط و دمای نهایی مورد استفاده صورت گرفت. به منظور کنترل بهتر دما و همچنین استفاده بهتر از فضای مورد استفاده، از المان‌های حرارتی الکتریکی در ساخت کوره استفاده شد. کل توان مورد نیاز از رابطه ترمودینامیکی زیر محاسبه شد:

$$E_h = \frac{Q \times (CP_a + CP_v \times H') (T_{in} - T_{am})}{V'} \quad (15)$$

که E_h توان حرارتی برحسب وات، Q دبی هوای ورودی به محفظه برحسب متر مکعب بر ثانیه، CP_a گرمای ویژه هوا $۱۰۰۴/۱۶$ ژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)، CP_v گرمای ویژه بخار (۱۸۸۲/۸ ژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)، H' رطوبت مطلق هوا، T_{in} دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن برحسب درجه سلسیوس و T_{am} دمای محیط برحسب درجه سلسیوس است. با استفاده از نمودار سایکرومتریک مقادیر V' و H' برای دمای هوای ۱۰ درجه سانتیگراد، به ترتیب برابر $۰/۸$ متر مکعب بر کیلوگرم هوای خشک و $۰/۰۰۵$ کیلوگرم بخار بر کیلوگرم هوای خشک بدست آمد. با استفاده از رابطه فوق مقدار توان مورد نیاز تقریباً برابر ۲۰۰۰ وات محاسبه شد. در نهایت با در نظر گرفتن ضریب اطمینان و بالا بردن قابلیت و کارایی دستگاه، ۱۱ المان حرارتی متشکل از ۸ المان ۵۰۰ وات و ۳ المان ۳۰۰ وات با مجموع توان $۴/۹$ کیلو وات در داخل کوره نصب شد.

۱-۲- مکانیزم ارتعاشی دستگاه

با فرض مرتعش شدن بستر مواد بصورت سینوسی در جهت عمودی، معادله حرکت صفحه به شکل زیر است:

$$y = A \cdot \sin(\omega t) \quad (16)$$

لامیزان جابجایی صفحه از سطح مرجع (سطح صفر) برحسب متر، t زمان برحسب ثانیه، A دامنه ارتعاش برحسب متر و ω سرعت زاویه‌ای برحسب رادیان بر ثانیه است. معادله عمومی حرکت ذره در سیستم محورهای ثابت (معادله موازنه نیروها) نیز بصورت زیر است:

$$-m\left(\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{d^2y'}{dt^2}\right) - mg + N + \sum R = 0 \quad (17)$$

که m جرم ذره برحسب کیلوگرم، d^2y/dt^2 مؤلفه عمودی شتاب صفحه نگهدارنده نسبت به سیستم دستگاه مختصات ثابت برحسب متر بر مجذور ثانیه، d^2y'/dt^2 مؤلفه عمودی شتاب ذره نسبت به صفحه نگهدارنده برحسب متر بر مجذور ثانیه، N نیروی قائم وارد بر کف بستر (نیروی عکس العمل سطح) برحسب نیوتن و $\sum R$ برآیند نیروهای مقاوم (نیروی اصطکاک، نیروی پسا و غیره) برحسب نیوتن است.

در لحظه جدا شدن بستر، با قرار دادن مقادیر N و d^2y'/dt^2 برابر صفر (ذره در حال جدا شدن می‌باشد ولی هنوز با صفحه در تماس است) و با دو بار مشتق‌گیری از رابطه ۱۶ (برای ماکزیمم شتاب) و جایگزینی در رابطه ۱۷، خواهیم داشت:

$$\frac{A\omega^2}{g} = 1 - \frac{\sum R}{mg} \quad (18)$$

در عمل، در نتیجه اثر دیگر نیروها، مقدار $A\omega^2/g$ برای جدا شدن بستر در مقایسه با مقدار محاسبه شده از رابطه ۱۸ بیشتر خواهد بود. این اختلاف همچنین با افزایش ارتفاع بستر و کاهش قطر ذرات افزایش می‌یابد. شرایط بهینه انتقال جرم و حرارت موقعی است که محدوده شتاب ارتعاشی ($A\omega^2$) بین ۲ تا ۶ برابر g باشد [۱۴ و ۱۹]. در عمل بکار بردن این شتاب در مقیاس صنعتی چندان ساده نیست. دو انتخاب مختلف در طراحی مکانیزم ارتعاشی وجود دارد:

- استفاده از ارتعاش کننده‌های مغناطیسی برای فرکانس‌های بالا و دامنه‌های ارتعاشی پائین (هرتز ۵۰ تا $f=$ و $A \leq 1$ mm)
- استفاده از ارتعاش کننده‌های مکانیکی برای فرکانس‌های پائین و دامنه‌های ارتعاشی بالا (هرتز ۱۰-۴ و $f=$ و $A=4-6$ mm)
در حالت دوم، امکان بدست آوردن ساختمان بهتری برای بستر مواد وجود دارد [۱۴]. بنابراین در طراحی مکانیزم ارتعاشی از یک مکانیزم مکانیکی لنگ و لغزنده با قابلیت تنظیم دامنه تا میزان ۵ میلی‌متر و فرکانس ارتعاشات تا میزان ۱۰ هرتز استفاده شد.

۱-۳- سیستم کنترل

به منظور کنترل دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن و همچنین کنترل دبی هوای ورودی به محفظه، یک سیستم کنترل رایانه‌ای طراحی و ساخته شد. این سیستم از ۴ قسمت اساسی تشکیل شده است که عبارتند از: منبع تغذیه سیستم، مدار اصلی کنترل، مدار تقویت کننده حسگرها و مدار راه انداز رله‌ها.

الف - منبع تغذیه سیستم

دستگاه دارای دو منبع تغذیه کاملاً جدا از هم است. یکی از این دو منبع تغذیه برای راه‌اندازی مدار اصلی کنترل و مدار تقویت کننده حسگرها که قسمت‌های اصلی و حساس سیستم کنترل را تشکیل می‌دهند، بکار می‌رود. منبع تغذیه دوم نیز برای رله‌ها و فن خنک کننده منبع تغذیه بکار می‌رود.

ب - مدار کنترل

شکل ۳، ساختار و طرح کلی مدار کنترل را نشان می‌دهد. به منظور صرفه‌جویی در هزینه ساخت مدار و کوچک‌تر شدن حجم آن، برای تمام حسگرها از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال استفاده شد. لیکن در هر لحظه تنها یکی از حسگرها از طریق مدار سوئیچ آنالوگ^{۱۳} به مبدل آنالوگ به دیجیتال متصل است و تنها مقدار آن نمونه برداری می‌شود. میکروکنترلر در فواصل زمانی مشخص، خروجی حسگرها را یکی یکی نمونه برداری کرده و از طریق پورت سریال به کامپیوتر ارسال می‌کند. کامپیوتر پس از ذخیره کردن این اطلاعات و نمایش آن روی صفحه مانیتور بر اساس استراتژی مشخص شده، مقادیر دمایی مورد نیاز و دور موتور را از طریق پورت سریال برای میکروکنترلر می‌فرستد. میکروکنترلر پس از دریافت این مقادیر، مقدار عددی (دیجیتال) دور موتور را به مبدل دیجیتال به آنالوگ می‌فرستد تا ولتاژی بین ۰ تا ۵ ولت برای کنترل دور موتور ایجاد شود. برای کنترل و تغییر دور این موتور در هنگام آزمایشات، از یک دستگاه تغییر دور فرکانسی استفاده شده است. این دستگاه Topvert مدل L2.2 7300 و ساخت کشور تایوان بوده و قادر به تغییر دور موتورهایی تا قدرت ۲/۲ کیلووات است. در واقع این دستگاه رابط میان سیستم کنترل و موتور دمنده می‌باشد. بطوری که خروجی مبدل دیجیتال به آنالوگ در شکل ۳، به کنترلر محاسبه‌گر قابل برنامه‌ریزی (PLC) موجود در این دستگاه فرستاده می‌شود و سپس این دستگاه دور موتور را با توجه به استراتژی مشخص شده تنظیم می‌کند. دستگاه مورد استفاده با ورودی برق ۲۲۰ ولت، خروجی ۳ فاز را برای موتور دمنده تأمین می‌کند. به منظور کنترل دما، در صورتیکه دمای ورودی کمتر از مقدار تعیین شده توسط کامپیوتر باشد، رله‌های بیشتری با توجه به پاسخ زمانی مشخص شده توسط کامپیوتر روشن شده و در غیر این صورت خاموش خواهند شد.

پ - مدار تقویت کننده حسگرها

همانطور که در طرح کلی مدار کنترل (شکل ۳) مشاهده می‌شود، دستگاه دارای ۵ حسگر دما و یک حسگر رطوبت می‌باشد. اولین حسگر دما در قسمت زانویی دستگاه و بعد از کوره حرارتی نصب شد. این حسگر وظیفه اندازه‌گیری دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن را بر عهده دارد. مدار کنترل نیز وظیفه کنترل و تنظیم دمای هوای ورودی را بر اساس مقدار قرائت شده توسط این حسگر، انجام می‌دهد. حسگرهای شماره ۲، ۳ و ۴ نیز به ترتیب وظیفه اندازه‌گیری دمای لایه‌های پائینی، میانی و بالایی بستر مواد را بر عهده دارند. آخرین حسگر دما نیز در قسمت خروجی محفظه خشک‌کن و درست در مجاورت حسگر رطوبت قرار می‌گیرد و وظیفه اندازه‌گیری دمای هوای خروجی را بر عهده دارد. تمامی حسگرهای دما از نوع AD590، ساخت کشور آمریکا بوده و خروجی آنها جریان الکتریکی ۱ میکروآمپر به ازاء هر درجه کلونین می‌باشد. سپس این خروجی به ولتاژ تبدیل می‌شود (۱ میلی‌ولت به ازاء هر درجه کلونین). از آنجا که این حسگرهای دما برای اندازه‌گیری دما در محدوده ۲۷۳ - تا ۱۵۰+ درجه سلسیوس (۰ تا ۴۲۳+ درجه کلونین) کاربرد دارند، محدوده خروجی آنها از ۰ تا ۴۲۳ میلی‌ولت تغییر می‌کند. سپس خروجی حسگرها توسط یک تقویت کننده ۱۰ برابر می‌شود، بطوریکه خروجی ۱۰ میلی‌ولت به ازاء هر درجه کلونین (۰ تا ۴/۲۳ ولت) را در پی خواهد داشت. حسگر رطوبت نیز از نوع HIH-3610 و ساخت کشور کره می‌باشد. ولتاژ خروجی حسگر رطوبت بصورت خطی با افزایش رطوبت نسبی هوا افزایش پیدا می‌کند.

ت - مدار رله‌ها

مدار رله‌ها از ۱۱ رله تشکیل شده است. به عبارت دیگر به ازاء هر المان حرارتی الکتریکی، یک رله در مسیر جریان ورودی به آن وجود دارد تا با توجه به نیاز حرارتی مورد نظر، جریان الکتریکی المان را قطع یا وصل نماید.

ث - نرم‌افزار سیستم کنترل

نرم‌افزار سیستم کنترل، به زبان Visual Basic نوشته شد. این برنامه وضعیت لحظه‌ای حسگرهای دما (T1 تا T5)، حسگر رطوبت (H) و دور در دقیقه موتور دمنده (RPM) را نشان می‌دهد و منحنی روند تغییرات آنها را در طی آزمایش ترسیم کرده و همچنین قادر است نتایج آزمایش را به نرم‌افزار Excel انتقال دهد. از دیگر قابلیت‌های برنامه امکان کالیبره کردن حسگرهای دما و رطوبت و تنظیم زمان قطع و وصل شدن المان‌های حرارتی و مقدار دور در دقیقه موتور دمنده می‌باشد.

۲- روش انجام آزمایشات

برای انجام آزمایشات از نمونه‌های چای مرطوب CTC استفاده شد، که رطوبت اولیه آنها ۶۰٪ بر پایه تر بود. به منظور ارزیابی دستگاه از نظر کیفیت شناورسازی، آزمایشات آیرودینامیک بستر مواد (تعیین منحنی افت فشار برحسب سرعت هوا) در دو حالت بستر شناور معمولی و بستر شناور ارتعاشی انجام شد. در حالت بستر شناور معمولی موتور محرک مکانیزم ارتعاشی دستگاه خاموش بود. در حالت بستر شناور ارتعاشی نیز بستر مواد با دامنه ۱ میلی‌متر و فرکانس ۱۰ هرتز (مقادیر رایج در خشک‌کن‌های بستر ارتعاشی برای خشک‌کردن چای در صنعت) صورت پذیرفت [۲۰].

برای اندازه‌گیری افت فشار، از یک فشارسنج تفاضلی^{۱۴} دیجیتالی مدل Testo استفاده شد که دارای دقت ± 1 میلی‌متر آب بود. اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در قسمت خروجی محفظه نیز با استفاده از یک سرعت‌سنج پره‌ای^{۱۵} Loutron مدل A-M-4202 صورت پذیرفت که دقت آن ± 0.1 متر بر ثانیه بود. حسگر پره‌ای این سرعت‌سنج در قسمت خروجی محفظه شناورسازی نصب می‌شد. اعداد قرائت شده توسط فشارسنج تفاضلی برابر افت فشار کل بود. به عبارت دیگر این فشارسنج مجموع افت فشار ناشی از صفحه توزیع کننده در زیر محفظه مواد و افت فشار ناشی از ستون ذرات را نشان می‌داد. بنابراین برای اندازه‌گیری افت فشار ذرات چای، لازم بود در ابتدا افت فشار ناشی از صفحه توزیع کننده را محاسبه کرد. برای این کار، محفظه خالی از مواد روی دستگاه قرار می‌گرفت. سرعت موتور محرک دمنده از طریق برنامه کامپیوتری به حدود صفر رسانده می‌شد. سپس با افزایش تدریجی دور موتور دمنده، سرعت هوا در قسمت خروجی با استفاده از سرعت‌سنج و افت فشار ناشی از تغییر سرعت هوا نیز توسط فشارسنج اندازه‌گیری می‌شد. بدین ترتیب، با ترسیم منحنی افت فشار برحسب سرعت (شکل ۴)، مدل رگرسیونی آن توسط نرم‌افزار Excel بصورت زیر بدست آمد:

$$\Delta P_d = 236.82u_g^2 - 63.902u_g + 35.452 \quad R^2 = 0.99 \quad (19)$$

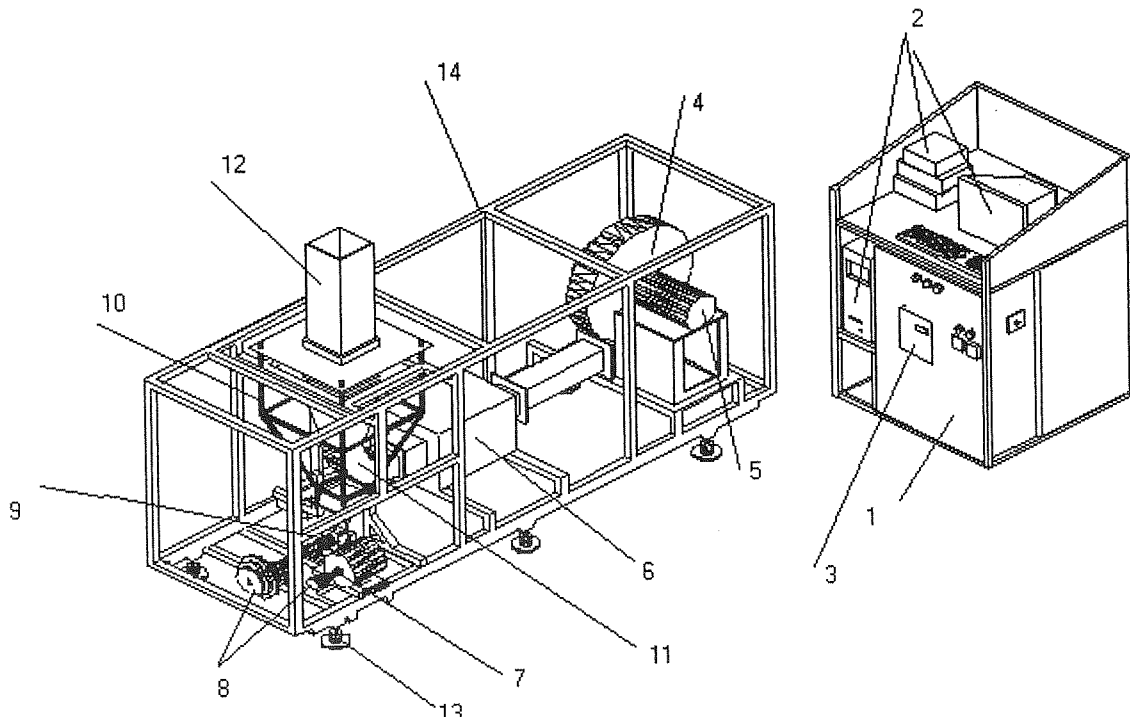
برای بدست آوردن افت فشار بستر ذرات در شرایط مورد نظر، ابتدا افت فشار کل در آن شرایط اندازه‌گیری شد و سپس مقدار بدست آمده توسط معادله ۱۹ در سرعت هوای مشخص، از آن کسر گردید.

۳- ارائه نتایج

نتایج حاصل از اندازه‌گیری افت فشار ناشی از ذرات چای در دو حالت بستر شناور معمولی و بستر شناور ارتعاشی به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶، نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در وضعیت بستر شناور معمولی، با افزایش سرعت هوا افت فشار نیز تا نقطه حداقل شناوری بصورت خطی افزایش پیدا می‌کند. بعد از نقطه حداقل شناوری، یک کاهش ناگهانی در افت فشار مشاهده می‌شود. از نکات قابل توجه در این شکل، مسئله وجود پدیده‌ای شبه پس‌ماند^{۱۶} در منحنی افت فشار می‌باشد. بدین معنی که افت فشار در مرحله رفت با افت فشار در مرحله برگشت تفاوت دارد. دلیل این نکته، تغییر تداخل بستر در مراحل رفت و برگشت است. در بسترهای شناور معمولی که پدیده شناورسازی در آنها به خوبی صورت گرفته است، بعد از نقطه حداقل شناوری، افت فشار یا بدون تغییر باقی می‌ماند و یا کاهش ناچیزی پیدا می‌کند. در حالی که در شکل ۵ بعد از این نقطه، کاهش نسبتاً شدیدی در افت فشار مشاهده می‌شود که به دلیل پدیده کانالیزه شدن بستر در اثر جریان هوا می‌باشد که در عمل نیز قابل مشاهده بود. در حالت بستر شناور ارتعاشی، همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت هوا ابتدا افت فشار افزایش یافته و سپس تقریباً ثابت باقی می‌ماند. از تفاوت‌های قابل ذکر در بین شکل‌های ۵ و ۶، عدم وجود پدیده شبه پس‌ماند در حالت بستر شناور ارتعاشی می‌باشد. همچنین کاهش ناگهانی و شدید افت فشار پس از مرحله حداقل شناوری، در شکل ۶ مشاهده نمی‌شود، که نشان دهنده کیفیت مناسب‌تر شناورسازی در این وضعیت است. از دیگر تفاوت‌های مهم بین حالت‌های بستر شناور معمولی و ارتعاشی، کاهش سرعت حداقل شناوری در وضعیت ارتعاشی می‌باشد. در وضعیت بدون ارتعاش، سرعت حداقل شناوری برابر 0.762 متر بر ثانیه (نقطه ماکزیمم منحنی شکل ۵) و در وضعیت بستر شناور ارتعاشی، برابر 0.5334 متر بر ثانیه (نقطه شروع قسمت تخت منحنی شکل ۶) اندازه‌گیری شد.

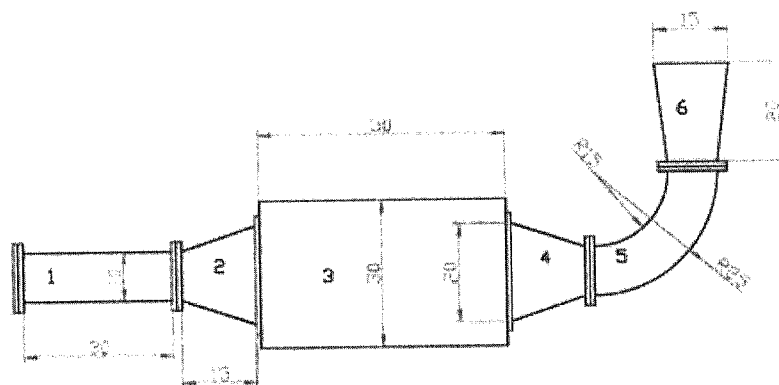
۵- نتیجه گیری

- ۱- در حالت بستر شناور معمولی (بدون ارتعاش)، به دلیل کانالیزه شدن بستر ذرات، پدیده شبه پس ماند در منحنی افت فشار- سرعت هوا مشاهده شد. اما در حالت بستر شناور ارتعاشی، تفاوتی میان منحنی افت فشار در مرحله افزایش سرعت و مرحله کاهش سرعت وجود نداشت که نشان از عملکرد مطلوب بستر شناور ارتعاشی برای محصولات مرطوب دارد.
- ۲- سرعت حداقل شناوری ($u_{g,mf}$)، در حالت بستر شناور معمولی در مقایسه با حالت بستر شناور ارتعاشی (فرکانس ۱۰ هرتز و دامنه ۱ میلی متر) برابر $0/5334$ متر بر ثانیه بدست آمد.



شکل (۱) نقشه سه بعدی دستگاه خشک کن بستر شناور ارتعاشی.

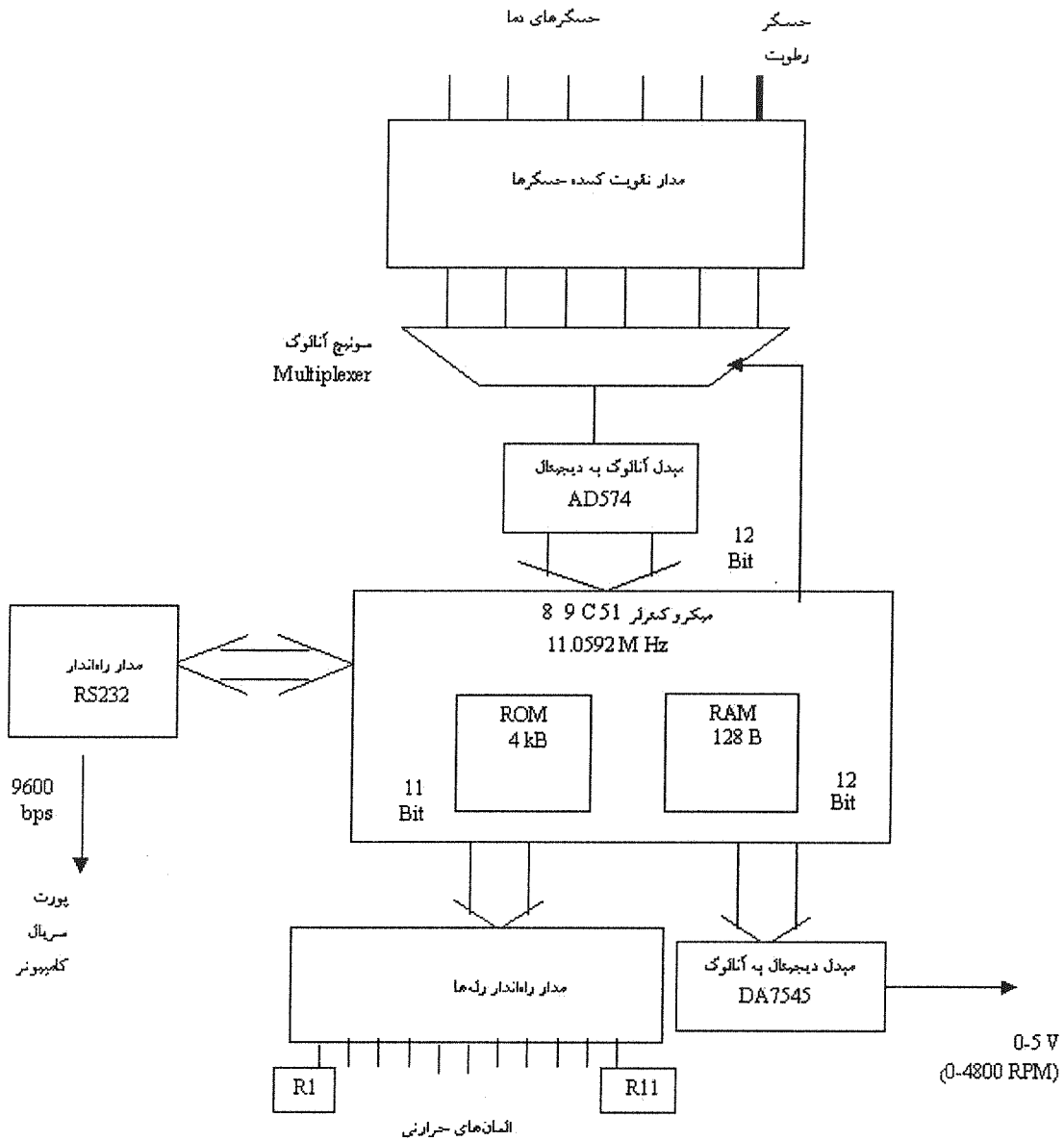
- ۱- تابلو برق، ۲- سیستم کنترل خودکار، ۳- دستگاه تغییر دور فرکانسی، ۴- دمنده، ۵- موتور دمنده، ۶- کوره الکتریکی، ۷- موتور محرک مکانیزم ارتعاش، ۸- پولی های چند شیاره، ۹- لنگ و لفرزنده، ۱۰- بازوهای مرتعش، ۱۱- زانوی ۹۰ درجه، ۱۲- محفظه شناورسازی، ۱۳- پایه های مستهلک کننده نوسانات، ۱۴- شاسی.



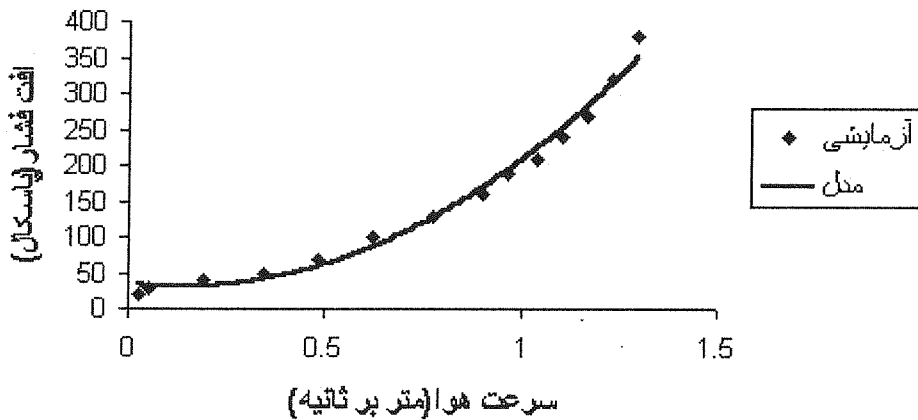
شکل (۲) طرحواره مسیر جریان هوا تا زیر محفظه خشک کن (ابعاد بر حسب سانتی متر).

جدول (۱) انتخاب مقادیر مناسب ضریب منفذ به ازاء عدد رینولدز [۱۵].

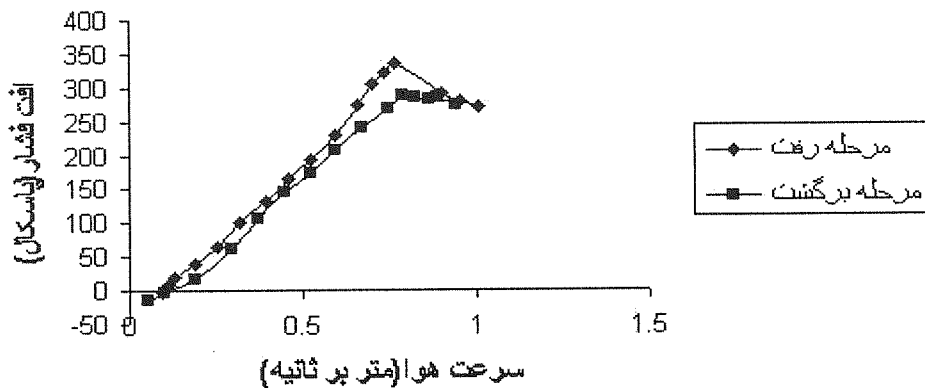
Re	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	≥ 3000
C_{or}	۰/۸	۰/۷	۰/۶۸	۰/۶۴	۰/۶۱	۰/۶



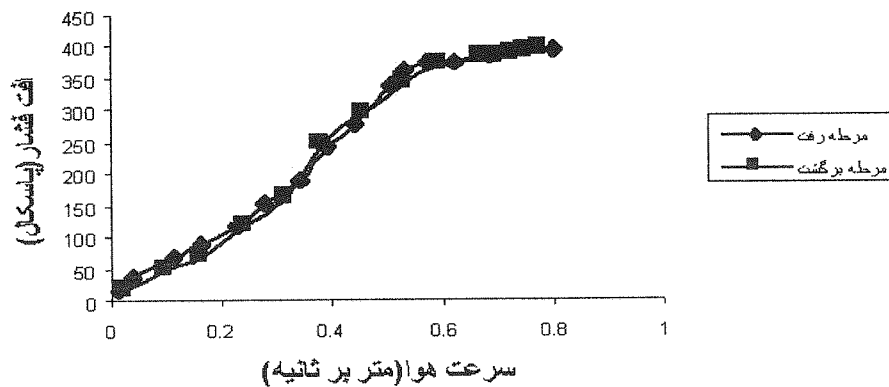
شکل (۳) ساختار و طرح کلی مدار کنترل.



شکل (۴) منحنی افت فشار صفحه توزیع کننده به تنهایی.



شکل (۵) رابطه افت فشار بستر مواد بر حسب سرعت هوا در وضعیت بستر شناور معمولی.



شکل (۶) رابطه افت فشار مواد بر حسب سرعت هوا در وضعیت بستر ارتعاشی (۱۰ هرتز - ۱ میلی متر).

علائم و نشانه‌ها

PW = توان موتور محرک دمنده (وات)	A = دامنه ارتعاش (متر)
Q = دبی هوا (متر مکعب بر ثانیه)	Ar = عدد ارشمیدس (بدون بعد)
R = نیروی مقاوم (نیوتن)	b = ضخامت شبکه (متر)
RH = رطوبت نسبی هوا (%)	C = ضریب منفذ (بدون بعد)
S = مساحت صفحه توزیع کننده (متر مربع)	CP = ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)
T = دمای هوا (درجه سلسیوس)	d = قطر متوسط یا میانگین ذرات (متر) و یا قطر سوراخ‌های شبکه در معادلات ۱۱ و ۱۲ (متر)
u = سرعت سیال (متر بر ثانیه)	D = قطر پروانه دمنده (متر)
V' = حجم مخصوص هوا (متر مکعب بر کیلوگرم هوای خشک)	E = توان حرارتی کوره (وات)
W' = دبی جرمی هوای خشک (کیلوگرم بر ثانیه)	g = شتاب نقل (متر بر مجذور ثانیه)
λ = فاصله صفحه از سطح مرجع (متر)	H = ارتفاع بستر ذرات (متر)
<u>حروف یونانی</u>	H' = رطوبت مطلق هوا (کیلوگرم بخار بر کیلوگرم هوای خشک)
ε = تخلخل بستر ذرات (بدون بعد)	k = ضریب افت فشار (بدون بعد)
ρ = جرم حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	m = جرم ذره (کیلوگرم)
μ = ویسکوزیته سیال (نیوتن ثانیه بر متر مربع)	n = تعداد سوراخ‌ها در هر متر مربع از شبکه
β = سطح آزادی شبکه (%)	N = دور موتور محرک دمنده (دور در دقیقه) و یا نیروی عکس‌العمل سطح در معادله ۱۷ (نیوتن)
ω = سرعت زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه)	Ns = سرعت مخصوص دمنده (بدون بعد)
<u>اندیس‌ها</u>	ΔP = افت فشار (پاسکال)
a = هوا	P = فشار استاتیک (پاسکال)
am = محیط	
b = بستر مواد	

OP = روزنه
 p = ذرات
 st = شرایط استاتیک
 t = انتقال مواد
 v = بخار

d = شبکه توزیع کننده هوا
 g = گاز
 h = کوره حرارتی (هیتر)
 in = هوای ورودی
 mf = حداقل شناوری

زیر نویس‌ها

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| 1- Fixed Bed | 10- Orifice Theory |
| 2- Drag Forces | 11- Open Area |
| 3- Minimum Fluidization | 12- Specific Volume |
| 4- Channeling | 13- Multiplexer |
| 5- Defluidization | 14- Differential Manometer |
| 6- Bulk Density | 15- Vane Anemometer |
| 7- Particle Density | 16- Hysteresis |
| 8- Transferring Velocity | |
| 9- Specific Speed | |

مراجع

- [۱] پهلوانزاده، ح (۱۳۷۷). خشک‌کردن: اصول، کاربرد و طراحی. (تألیف سزلا استرامیلو و تادیوز کودرا) چاپ اول. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۴۵۵ ص.
- [۲] متین، ا. ح (۱۳۷۰). تهویه صنعتی. جلد اول. چاپ اول، ۳۷۵ ص.
- [3] Akiyama, T. and Yamaboshi, H. (1992). Behaviour of vibrating beds of irregular particles. Powder Technology, 69: 163-69.
- [4] Arallo, E.V, Depadua, D. B. and Graham, M. (1976). Rice, Post harvest technology. Ottawa: International Development Research, Canada.
- [5] Bleier, P. F. (1998). Fan Handbook. New York: McGraw-Hill. U.S.A.
- [6] Brauer, H. and Mewes, D. (1972). Design of fluid bed drier. Chemical Industrial Technology, 44(13): 865.
- [7] Dutta, A. and Dullea, L. V. (1991). Effects of external vibration and the addition of fibers on the fluidization of a fine powder. AIChE Symposium Series, Advances in Fluidized System, 87(281): 38-46.
- [8] Geldart, D. (1973). Types of gas fluidisation. Powder Technology, 7: 285-92.
- [9] Hongfan, Y. (1985). Thermal and physical properties of tea. Journal of tea science, 5(1): 1-6.
- [10] Krill, L. and Schmitt, W. (1997). Sugar drying and cooling in a fluidized bed drier. Zucker Industrie, 122(8): 585-603.
- [11] Kunii, D. and Levenspiel, O. (1991). Fluidization Engineering. Stoneham: Butterworth-Heinemann, U.S.A.
- [12] McCabe, L. W., Smith, J. C. and Harriot, P. (1988). Unit operation of chemical engineering. New York: Mc Grow Hill Book Company, U.S.A.
- [13] Mori, S., Yamamoto, A., Iwata, S., Haruta, T. Yamada, Y. and Mizutani, E. (1990). Vibro-fluidization of group-C particles and its industrial application. AIChE Symposium Series, Advanced in Fluidization Engineering, 86(276): 88-94.
- [14] Pakowski, Z. and Strumillo, C. (1980). Drying 80, Vol.2. New York: Hemisphere pub. Corporation, U.S.A.
- [15] Pell, M. (1990). Gas fluidization. Amestersam: Elsevier Science, Netherland.
- [16] Proctor, D. L. (1994). Grain storage technology. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations(FAO), Italy.
- [17] Reay, D. and Baker, C. G. J. (1985). Drying. In: Fluidization, eds. Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D., pp. 529-62. London: Academic Press, England.
- [18] Shah, R. M. and Goyel, S. K. (1995). Drying characteristics of tea fluidized on a vibratung bed (part II)_ Handling of dust and its impact on quality. Drying Technology, 13 (5-7): 1523-41.
- [19] Strumillo, C. and Pakowski, Z. (1980).). Drying 80, Vol.1. New York: Hemisphere pub. Corporation, U.S.A.
- [20] Temple, S. J. and Van Boxtel, A. J. B. (1999). Fluidization of tea. Journal of Agricultural Engineering Research, 74(1): 5-11.
- [21] Viktorin, Z. (1988). Fluidized bed drier of powders. Proceeding Symposium on Drying. Pardobice: S.N.T.L, Czech.