



سازمان جهاد دانشگاهی  
تهران



جمهوری اسلامی  
ایران

سازمان جهاد دانشگاهی تهران  
معاونت پژوهش و فناوری

طراحی و ساخت دستگاه پودر  
میکرونیزه جهت مواد آلی حساس  
به حرارت  
(۲۱-۲۴۳۹)

پرویز احمدی اول  
گروه پژوهشی طراحی فرایندهای شیمیایی

آبان ماه ۱۳۹۶



## شناسنامه گزارش

عنوان گزارش: طراحی و ساخت دستگاه پودر میکرونیزه جهت مواد آلی حساس به حرارت  
 شماره ویرایش: دوم  
 عنوان فارسی طرح پژوهشی: طراحی و ساخت دستگاه پودر میکرونیزه جهت مواد آلی حساس به حرارت  
 عنوان انگلیسی طرح: Design and construction of micronized powder production machine for heat sensitive organic compound  
 کد طرح: ۲۴۳۹-۲۱  
 نام فایل گزارش: Micronized Powder V2  
 تالیف کننده‌ها: پرویز احمدی اول، دکتر زهرا شیبانی فرد  
 ویرایش علمی: پرویز احمدی اول، دکتر زهرا شیبانی فرد  
 ویرایش ادبی: پرویز احمدی اول، دکتر زهرا شیبانی فرد  
 تاریخ طرحنامه: ۹۴/۸/۷  
 تاریخ تصویب در شورای بررسی نهایی طرح‌ها: ۹۵/۸/۱  
 تاریخ شروع اجرای طرح: ۹۵/۸/۹  
 سطح دسترسی به سند: نامحدود/ محرمانه (بدون موافقت کتبی، نسخه برداری یا تکثیر ممنوع است)

کارکرد در طرح به ساعت	عناوین فعالیت‌هایی که در طرح انجام داده‌اند	تخصص	محل استخدام	نام مسئول یا همکار
۶۴۰	مسئول طرح	شیمی	سازمان جهاد دانشگاهی تهران	پرویز احمدی اول
۶۴۰	جمع آوری اطلاعات، طبقه بندی و تجزیه و تحلیل اطلاعات	شیمی-همکار	-	دکتر زهرا شیبانی فرد
۲۰۰	محاسبات مهندسی	مشاور طراحی مهندسی	-	دکتر مرتضی جعفری کجور
۵۰	مشاور علمی	مشاور طراحی مهندسی	-	دکتر فتح الله پور فیاض
۵۰	امور آزمایشگاهی	همکار	سازمان جهاد دانشگاهی تهران	مهدی روزبھانی
۵۰	امور برق و تدارکات	همکار	سازمان جهاد دانشگاهی تهران	مظفریان

سازمان مجری: جهاد دانشگاهی واحد تهران  
 گروه مجری: گروه پژوهشی طراحی فرایندهای شیمیایی  
 نشانی: تهران، خیابان انقلاب، خیابان ۱۶ آذر، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، طبقه دوم  
 تلفن محل کار تالیف کننده اصلی: ۰۲۱-۶۶۴۹۵۲۱۶ - ۶۶۴۱۲۷۳۵  
 نشانی پست الکترونیک تالیف کننده اصلی: [pchemco@gmail.com](mailto:pchemco@gmail.com)

## چکیده

استفاده از مواد جامد در واکنشها و فرمولاسیون صنایع شیمیایی، در اکثر مواقع مستلزم کاهش اندازه ذرات میباشد. خردایش یا کاهش اندازه ذرات جامد متناسب با نوع ماده و اندازه مورد نیاز برای ذره نهایی، با بکار گیری آسیاب های مختلف امکان پذیر است. از آنجمله میتوان آسیابهای Ball mill, Cutting End Hummer, Pin mill, Roll mill, را نام برد. در اکثر مواقع عمل خردایش با اصطکاک بین مواد و سطوح آسیاب همراه است و بالا رفتن دمای مواد اجتناب ناپذیر است. به همین خاطر استفاده از عملیات آسیاب کردن برای برخی از جامدات آلی که نقطه ذوب پایینی دارند امکان پذیر نمیباشد. زیرا افزایش دمای این مواد در داخل آسیاب باعث خمیری شدن آنها شده و عمل خردایش آنها انجام نمیگیرد. یکی از راهکارهای آسیاب کردن این مواد، خنک کردن ذرات جامد بعضاً تا کمتر از ۳۰- درجه سلسیوس قبل از ورود آنها به سیستمهایی مانند Jet mill و Hummer mill میباشد که هزینه های کار را بشدت افزایش می دهد.

در حال حاضر برخی از مواد آلی تولیدی در گروه طراحی فرآیندهای شیمیایی، ترکیباتی با نقطه ذوب حدود ۹۰ درجه سلسیوس میباشند و برای تبدیل این مواد به پودر میکرونیزه، شامل چندین مرحله است که علاوه بر زمان بر بودن، هزینه زیادی در بر دارد و اتلاف مواد به علت ایجاد غبار بسیار زیاد میباشد. در طرح حاضر به کارفرمایی دفتر مرکزی جهاد دانشگاهی، مطالعه مقالات، پتنتها و تعداد زیادی از گزارشهای تحقیقاتی شرکتهای معتبر صنعتی و مراکز آکادمیک در دنیا صورت پذیرفت تا اطلاعات مقدماتی مورد نیاز جهت ورود به مرحله عملیاتی طرح جمع آوری گردد.

**کلید واژگان:** پودر میکرونیزه، خردایش، مواد حساس به حرارت، ذرات جامد

## پیشگفتار

در این طرح برآنیم تا با الگو برداری از سیستم Spray Dryer و ایجاد تغییرات لازم در آن، مواد آلی با نقطه ذوب پایین را به بدون نیاز به سرمایش اولیه، به پودر میکرونیزه تبدیل کنیم. در حال حاضر برخی از مواد آلی تولیدی در گروه طراحی فرآیندهای شیمیایی، ترکیباتی با نقطه ذوب حدود ۹۰ درجه سلسیوس می‌باشند. فرآیند تولید این مواد در دمای بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس بوده و در انتهای فرآیند تولید در داخل راکتور به صورت مذاب می‌باشند. برای تبدیل این مواد به پودر میکرونیزه، ابتدا این مواد وارد سینی‌های مخصوص شده و سرد و جامد می‌گردد. سپس این مواد در داخل سردخانه قرار می‌گیرد و تا دمای ۳۰ درجه زیر صفر خنک می‌شود. در مرحله پایانی، این جامد خنک وارد آسیاب شده و به پودر تبدیل می‌گردد. این فرآیند علاوه بر زمان بر بودن، هزینه زیادی در بر دارد و اتلاف مواد به علت ایجاد غبار بسیار زیاد می‌باشد.

### هزینه‌های تولید پودر در روش فعلی:

با احتساب ۲ روز برای تخلیه راکتور در سینی‌های انجماد و ۴ روز برای خردایش اولیه و بلغوری کردن و ۱۲ بار تکرار در سال و بکارگیری ۴ نیروی کاری تمام وقت و ۴ روز برای عملیات جت میل و نیاز به سرمایش تا ۳۰- درجه سلیسیوس و هزینه‌های استهلاک و انرژی مربوط به سیستم جت میل و با در نظر گرفتن اینکه حدوداً ۳۰- ۴۰ درصد زمان و فضای کار به تولید پودر مورد نظر تعلق می‌گیرد، حداقل سالانه بالغ بر ۵۰۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال هزینه این عملیات خواهد شد. حال آنکه برای کار با سیستم پودر میکرونیزه با توجه به ظرفیت اتن در روز فقط به ۳۰ روز عملیات کاری در مقابل ۱۲۰ روز عملیات مربوط به سیستم جت میل نیاز بوده و هزینه‌ها تا ۷۵٪ تقلیل می‌یابد یعنی چیزی بالغ بر ۱۰۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال.

در روش پیشنهادی جدید همان مایع مذاب داخل راکتور با استفاده از سیستم پاششی مناسب به پودر میکرونیزه تبدیل می‌گردد و بدین ترتیب چندین مرحله عملیاتی از مسیر فرآیند تولید پودر حذف شده و هزینه‌های عملیات تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد.

فرآیند خشک کن‌های پاششی به صورت بسیار فراگیر در صنعت استفاده می‌گردد و تئوری مبنای علمی آن در کتاب-های بسیاری وجود دارد. از جمله پارامترهای مهم در طراحی خشک کن پاششی می‌توان به دمای مایع خوراک، حساسیت خوراک به گازهای مختلف، جرم مخصوص و گرمای

ویژه ماده خشک، ویسکوزیته خوراک و مقدار محصول اشاره نمود. در این طرح با استفاده از پایه علمی مربوط به طراحی خشک کن‌های پاششی، اقدام به ساخت سیستم انجمادی کردیم که در آن پاشش مایع مذاب به داخل دستگاه و جامد شدن آن در داخل محفظه دستگاه منجر به تولید پودر میکرونیزه می‌گردد.

پرویز احمدی اول

۱۳۹۶/۸/۱

Archive of SID

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول) مبانی نظری و پیشینه تحقیق:</b>
۲.....	<b>بخش ۱) اتمیزه و ریز سازی (Atomization)</b>
۶.....	۱-۱) اساس عملکرد یک اتمایزر
	۲-۱) پارامترهای اتمیزه یا ریزسازی (Atomization)
۶.....	(Parameters
	۱-۲-۱) فشار اسپری کردن یا ریزسازی (Atomization
۷.....	(Pressure
	۲-۲-۱) سرعت جریان ماده اولیه (Feed Flow Rate)
	۳-۲-۱) ویسکوزیته و دانسیته ماده اولیه (Feed
۷.....	(Viscosity
	۴-۲-۱) کشش سطحی ماده اولیه (Feed Surface
۷.....	(Tension
	۳-۱) فواید ریز شدن
۸.....	<b>بخش ۲) سیکلون‌ها و محفظه‌های جدا کننده (Chambers</b>
	<b>&amp;Cyclones)</b>
۹.....	۱-۲) جداکننده سیکلونی (Cyclone separator)
	۲-۲) فیلتر کیسه‌ای (Bag filter)
	۳-۲) جمع کننده‌های الکتروستاتیک (Electrostatic
۲۱.....	(Precipitator
۲۲.....	۴-۲) اسکرابرهای مرطوب (Wet Scrubber)
۲۳.....	<b>بخش ۳) نازل</b>
۲۳.....	۱-۳) انواع نازل
	۱-۱-۳) نازل‌های فشاری یا هیدرولیک (Pressure
۲۳.....	(Nozzle
	۲-۱-۳) نازل‌های اغتشاشی (Turbulence Nozzle)
	۳-۱-۳) نازل‌های چرخان (Rotary Nozzle)
	۴-۱-۳) ونتوری نازل (Venturi Nozzle)
	۵-۱-۳) نازل‌های ضربه‌ای (Impact Nozzle)
	۶-۱-۳) نازل کمک-هوایی (Air-Assisted Nozzle)
	۷-۱-۳) نازل ایر بلاست (Air-Blast Nozzle)
	۸-۱-۳) نازل فراصوت (Ultrasonic Nozzle)
	۹-۱-۳) نازل الکتروهیدرودینامیک
۳۱.....	(Electrohydrodynamic Nozzle)
	۲-۳) طبقه بندی نازل‌ها بر اساس تعداد سیال و
۳۳.....	ساختار خروجی
	۱-۲-۳) نازل اتمایزکننده تک سیال (Single-Fluid
۳۳.....	(Nozzle
	۱-۱-۲-۳) نازل تک-سیال (دهانه مسطح) (Plain-

- ۳۳..... (Orifice Nozzle  
۲-۱-۲-۳) نازل تک-سیال (دهانه V شکل) (v-)
- ۳۴..... (Shaped Orifice Nozzle  
۳-۱-۲-۳) نازل تک-سیال (سطح-برخورد)
- ۳۵..... (Surface-Impingement Single-Fluid Nozzle)  
۳-۱-۲-۴) نازل تک-سیال (فشار-چرخش)
- ۳۶..... (Pressure-Swirl Single-Fluid Nozzle)  
۲-۲-۳) نازل اتمایزکننده دو-سیال (Two-Fluid)
- ۳۷..... (Nozzle  
۱-۲-۲-۳) نازل دو-سیال ترکیب داخل (Internal-)
- ۳۹..... (Mix Two-Fluid Nozzle  
۲-۲-۲-۳) نازل دو-سیال ترکیب خارج
- ۳۹..... (External-Mix Two-Fluid Nozzle)
- ۴۰..... (Compound Nozzle) نازل ترکیبی
- ۴۰..... عوامل موثر بر کارایی نازل
- ۴۰..... خواص مایع
- ۴۱..... دما
- ۴۱..... (Specific Gravity) وزن مخصوص
- ۴۱..... جنس نازل
- ۴۲..... کشش سطحی
- ۴۲..... عوامل منفی بر کارایی نازل
- بخش ۴) انواع الگوهای اسپری**
- ۴۵..... (۱-۴) الگوی مخروطی کامل
- ۴۵..... (۱-۱-۴) الگوی مخروط کامل استاندارد (Standard Full Cone)
- ۴۶..... (۲-۱-۴) الگوی مخروط کامل مارپیچی (حلزونی)
- ۴۶..... (۳-۱-۴) الگوی چند مخروط کامل
- ۴۷..... (۴-۱-۴) الگوی اسپری مسطح (Flat Fan Spray Pattern)
- ۴۷..... (۲-۴) الگوی اسپری مخروطی میان تهی (Hollow Cone Spray Pattern)
- ۴۸..... (Spray Pattern)
- بخش ۵) مکانیسم تولید اسپری**
- بخش ۶) زاویه اسپری**
- بخش ۷) ویسکوزیته مایع**
- ۵۷..... (۱-۷) اثر ویسکوزیته بر روی میزان جریان نازل
- ۵۷..... (۲-۷) اثر ویسکوزیته بر زاویه و الگوی اسپری
- ۵۹.....
- بخش ۸) مورفولوژی ذرات (Morphology Of Particle)**
- بخش ۹) مزایا و کاربردهای دستگاه پودرمیکرونیزه**
- ۶۵..... (۱-۹) کاربردهای دستگاه پودر میکرونیزه
- ۶۵..... (۱-۱-۹) کاربردهای غذایی
- ۶۵..... (۲-۱-۹) کاربردهای صنعتی
- فصل دوم) طراحی دستگاه :**
- بخش ۱) مراحل ساخت دستگاه (محاسبات و نقشه های مهندسی)**
- ۶۸.....





۶۸.....	میکرونیزه
۸۲.....	نقشه‌های مهندسی دستگاه پودر میکرونیزه
۹۷.....	بخش ۲) بررسی عملکرد دستگاه
	فصل سوم) جمع بندی و نتیجه گیری:
۱۱۱.....	جمع بندی
۱۱۳.....	مراجع
۱۱۹.....	ضمائم



**فصل اول) مبانی نظری و پیشینه تحقیق:**

جدول ۶-۱: پهنای تئوری اسپری در فواصل مختلف از دهانه خروجی نازل .....	۵۵
جدول ۷-۱: واحدهای اندازه گیری ویسکوزیته .....	۵۷
جدول ۷-۲: مقادیر فاکتور تصحیحی F .....	۶۰

فصل اول) مبانی نظری و پیشینه تحقیق:

- شکل ۱-۱ شمایی از پایداری مایع و تشکیل قطرات (بر اساس مدل جوزف پلاتیو) ..... ۳
- شکل ۱-۲: مرحله میانی شکستن جت و تبدیل آن به قطره ..... ۴
- شکل ۱-۳: شمایی از اساس عملکرد نازل ..... ۶
- شکل ۱-۲: شمایی از یک سیکلون جدا کننده ..... ۱۲
- شکل ۲-۲: انواع جدا کننده‌های سیکلونی موجود در صنایع ..... ۱۴
- شکل ۲-۳: پارامترهای ابعادی در یک سیکلون جدا کننده ..... ۱۶
- شکل ۲-۴: پالس جت برای پاکسازی سطح فیلترهای پوشیده شده با غبار ..... ۲۱
- شکل ۲-۵: جمع کننده‌های الکتروستاتیک ..... ۲۱
- شکل ۳-۱: نازل فشاری یا هیدرولیک ..... ۲۴
- شکل ۳-۲: نازل اغتشاشی ..... ۲۵
- شکل ۳-۳: نازل چرخان ..... ۲۶
- شکل ۳-۴: اثر ونتوری ..... ۲۸
- شکل ۳-۵: نازل ضربه‌ای و شمایی از طرح اسپری حاصل از آن ..... ۲۸
- شکل ۳-۶: شمایی از یک air-assisted nozzle (با آرایش ترکیب داخلی) ..... ۲۹
- شکل ۳-۷: ایر بلاست نازل ..... ۳۰
- شکل ۳-۸: شمایی از عملکرد نازل فراصوتی ..... ۳۱
- شکل ۳-۹: مکانیسم عملکرد یک الکترواسپری ..... ۳۲
- شکل ۳-۱۰: شمایی از یک نازل مسطح-دهانه (plain-orifice nozzle) ..... ۳۳
- شکل ۳-۱۱: شمایی از یک نازل دهانه V شکل (V-shaped osific nozzle) ..... ۳۴
- شکل ۳-۱۲: نازل اسپری سطح-برخورد ..... ۳۵
- شکل ۳-۱۳: نازل اسپری مارپیچی ..... ۳۶
- شکل ۳-۱۴: نازل تک-سیال (فشار-چرخش) ..... ۳۶
- شکل ۳-۱۵: نازل دو سیال ..... ۳۸
- شکل ۳-۱۶: (الف) نازل ترکیب خارجی و (ب) نازل ترکیب داخلی ..... ۳۹
- شکل ۳-۱۷: نازل مرکب فشار-چرخش (الگوی گسترده) ..... ۴۰
- شکل ۴-۱: انواع الگوی اسپری ..... ۴۴
- شکل ۴-۲: شمایی از الگوی یک مخروط کامل استاندارد ..... ۴۵

- شکل ۳-۴: نمایی از یک الگوی مخروط کامل مارپیچی ..... ۴۶
- شکل ۴-۴: چند مخروط کامل (cluster nozzle) ..... ۴۷
- شکل ۵-۴: الگوی اسپری سطح ..... ۴۸
- شکل ۶-۴: الگوی اسپری مخروطی میان تهی ..... ۴۸
- شکل ۵-۱: تصویری شماتیک از فرآیند تشکیل قطره ضمن فرآیند اسپری کردن ..... ۴۹
- شکل ۵-۲: تصویری شماتیک از فرآیندهای فروپاشی مایع و تشکیل قطره بر اساس دو نوع مکانیسم ..... ۵۰
- شکل ۶-۱: محاسبه پهنای تئوری اسپری و زاویه اسپری ..... ۵۴
- شکل ۶-۲: نمودار تغییرات زاویه اسپری برحسب فشار برای دو نوع نازل مخروط کامل و مسطح ..... ۵۶
- شکل ۶-۳: الگوی زوایای اسپری مختلف در فشارهای متفاوت ..... ۵۶
- شکل ۷-۱: شمایی از یک نازل مخروط توخالی پرخشی (whirl hollow cone nozzle) ..... ۵۸
- شکل ۷-۲: نموداری از تغییرات مقدار سرعت جریان بر حسب قطر محفظه چرخش ..... ۵۸
- شکل ۸-۱: مورفولوژی های مختلف در فرآیند خشک کن پاششی یا اسپری درآینگ ..... ۶۱
- شکل ۸-۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی ذرات بدست آمده از اسپری درآینگ (a) سطح صاف (b) تشکیل حفره تنفسی (c) توده ای شدن (d) سطح تورفته یا گود رفته ..... ۶۲
- فصل دوم) طراحی دستگاه :**
- شکل ۱-۱: ضریب مقاومت ذره در حال سقوط بر اساس  $Re$  (در محدوده  $1 < Re < 1000$ ) ..... ۷۳
- شکل ۱-۲: پروفایل دمایی در درون قطرات کروی در حال انجماد ..... ۷۶
- شکل ۱-۳: ضریب اصلاح زمان مورد نیاز برای خشک شدن قطره .. ۷۷
- شکل ۱-۴: نمای شماتیک سیکلون مدل ID3D ..... ۸۱
- شکل ۱-۵: نقشه اجزای تشکیل دهنده سیستم پودر ساز و نحوه چینش آنها روی پلت فرم ..... ۸۲
- شکل ۱-۶: نقشه پلت فرم سیستم پودر ساز و نحوه اتصال آنها به یکدیگر ..... ۸۳
- شکل ۱-۷: نقشه اجزای روتاری والو سیستم پودر ساز ..... ۸۴
- شکل ۱-۸: نقشه هد نازل ..... ۸۵
- شکل ۱-۹: نقشه حوضچه مذاب و هیتر مربوطه و محل قرار گیری نازل های شش گانه سیستم پودر ساز ..... ۸۶

- شکل ۱-۱۰: نقشه فیلتر بگ مجهز به شش بسکت ..... ۸۷
- شکل ۱-۱۱: کروکی اولیه فیلتر بگ ..... ۸۸
- شکل ۱-۱۲: نقشه باز شده وجوه فیلتر بگ سیستم پودر ساز ..... ۸۹
- شکل ۱-۱۳: نقشه ترپ پودر ..... ۹۰
- شکل ۱-۱۴: کروکی سیکلون ..... ۹۱
- شکل ۱-۱۵: ساخت پلت فرم و نصب مخزن انبساط و فیلتر بگ بر روی آن ..... ۹۲
- شکل ۱-۱۶: ساخت مخزن تامین مذاب و رابطها ..... ۹۳
- شکل ۱-۱۷: ساخت ترپ پودر و روتاری والو و نصب آنها به سیکلون ..... ۹۴
- شکل ۱-۱۸: ساخت و تنظیم نازلها با شش هد پاشش و نصب آن بر روی درب مخزن انبساط ..... ۹۵
- شکل ۱-۱۹: انتقال قطعات دستگاه به دانشکده فنی و اقدام به مونتاژ آنها در تاریخ ۱۳۹۶/۵/۹ ..... ۹۶
- شکل ۲-۱: آنالیز DLS مربوط به استئاریک اسید در دو دمای ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد ..... ۹۹
- شکل ۲-۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه اسید آلی در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد ..... ۱۰۰
- شکل ۲-۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه اسید آلی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد ..... ۱۰۰
- شکل ۲-۴: آنالیز SLS مربوط به استئاریک اسید در دو دمای ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد ..... ۱۰۱
- شکل ۲-۵: مقایسه آنالیز DLS مربوط به گلیسرین مونو استئارات پودر شده با دو روش ..... ۱۰۲
- شکل ۲-۶: تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه استر آلی با آسیاب ..... ۱۰۴
- شکل ۲-۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه استر آلی با دستگاه پودر ساز طراحی شده ..... ۱۰۴
- شکل ۲-۸: مقایسه آنالیز SLS مربوط به گلیسرین مونو استئارات پودر شده با دو روش ..... ۱۰۵
- شکل ۲-۹: آنالیز DLS مربوط به SUN MIX در دو دمای ۱۲۵ و ۱۴۵ درجه سانتی گراد ..... ۱۰۶
- شکل ۲-۱۰: تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه SUN MIX در دمای ۱۴۵ درجه سانتی گراد ..... ۱۰۷
- شکل ۲-۱۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه SUN MIX در دمای ۱۲۵ درجه سانتی گراد ..... ۱۰۷

- شکل ۲-۱۲: آنالیز SLS مربوط به SUN MIX در دو دمای ۱۲۵ و ۱۴۵ درجه سانتی گراد..... ۱۰۸
- شکل ۲-۱۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه SUN MIX تولید شده با دستگاه جت میل..... ۱۰۹
- شکل ۲-۱۴: آنالیز DLS مربوط به نمونه SUN MIX پودر شده توسط دستگاه جت میل..... ۱۰۹
- شکل ۲-۱۵: آنالیز SLS مربوط به نمونه SUN MIX پودر شده توسط دستگاه جت میل..... ۱۰۹



# فصل اول

## مبانی نظری و پیشینه تحقیق

Archive of SID

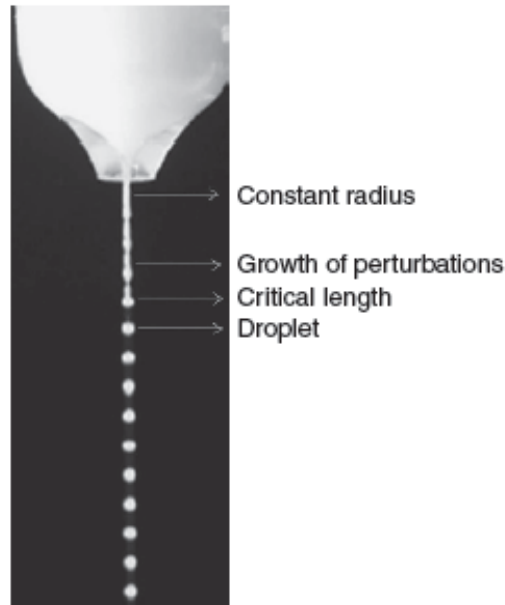
## بخش ۱- اتمیزه یا ریز سازی (Atomization)

بطور کلی قلب فرآیند پودر سازی در همه دستگاه‌ها و سیستم‌های اسپری مرحله اتمیزه یا ریز سازی است. اگر چه تعاریف مختلفی برای اتمیزه یا ریز سازی وجود دارد، یکی از تعاریف اولیه از این روند، توسط ساموئل پرسی<sup>۱</sup> (۱۸۷۲) بسیار جالب و دقیق است: "تبدیل مواد مایع و یا جامد به حالت کوچک" [۱ و ۲]. اتمیزه کردن یا اتمی شدن یک مایع با استفاده از یک سیال تراکم پذیر مانند هوا یا گاز تعریف شده است. در واقع، اتمیزه را می‌توان در نتیجه ایجاد شکست در مایع با توجه به اثرات ناشی از کشش سطحی و نیروهای داخلی و خارجی که در سطح مشترک بین گاز و مایع عمل می‌کنند دانست و در صورت عدم وجود چنین نیروهایی، کشش سطحی تمایل به جذب مولکول‌های مایع و تشکیل جت یا فیلم یا لایه نازکی از مایع دارد. در این فرآیند یک متر مکعب از مایع تقریباً  $2 \times 10^{12}$  قطره ۱۰۰ میکرونی با مساحت سطحی بیش از  $60000 \text{ m}^2$  تشکیل می‌دهد و بدین ترتیب می‌توان ذراتی با مورفولوژی و خصوصیات فیزیکی مورد نظر طراحی کرد [۳]. جوزف پلاتیو<sup>۲</sup> برای اولین بار برای در سال ۱۸۷۳، بی‌ثباتی مایع را از طریق مشاهدات تجربی خود توصیف کرد [۴]. بر این اساس، جت یا جهش مایع، با یک شعاع ثابت، به صورت عمودی تحت نیروی گرانش می‌افتد. طول مایع افزایش می‌یابد و به یک مقدار بحرانی می‌رسد. در این مقدار بحرانی، جت شکل استوانه‌ای خود را از دست داده و به یک جریان از قطرات تفکیک می‌شود که عمدتاً به دلیل کاهش کشش سطحی می‌باشد (شکل ۱-۱).

<sup>1</sup> Samuel R. Percy

<sup>2</sup> Joseph Plateau

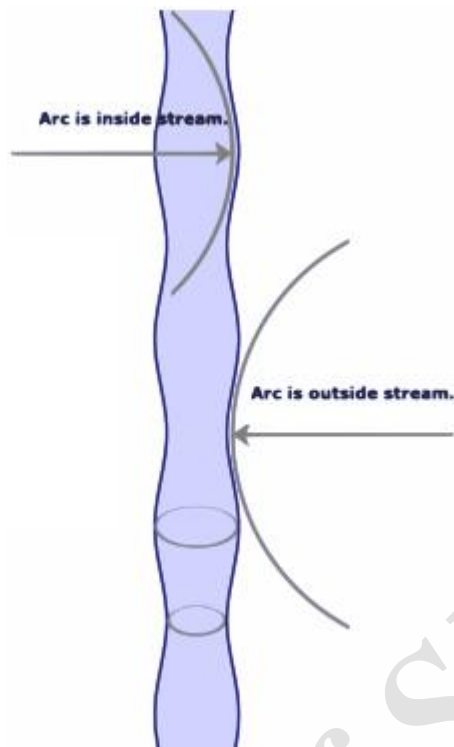




شکل ۱-۱- شمایی از ناپایداری مایع و تشکیل قطرات (بر اساس مدل جوزف پلاتیو)

لرد ریلی<sup>۱</sup> نیز در سال ۱۸۷۸ مشاهدات تجربی جوزف پلاتیو را تایید کرد و توضیحات تحلیلی را بر اساس مشاهدات فیزیکی ارائه کرد که امروزه به تئوری جت مایع (Liquid jet theory) و یا تئوری ناپایداری پلاتیو و ریلی (Plateau-Rayleigh instability) شهرت دارد [۵]. بر اساس این تئوری ناپایداری یا بی ثباتی در مایع با ایجاد یک آشفتگی کوچک در جریان مایع شروع می‌شود و برخی از این آشفتگی‌ها با گذشت زمان رشد می‌کنند و برخی دیگر از بین می‌روند. در بین اجزایی که با گذشت زمان رشد می‌کنند، برخی سریع‌تر از دیگران رشد می‌کنند و این که آیا یک جزء واپاشی یا رشد می‌کند و با چه سرعتی رشد می‌کند به طور کامل تابعی از عدد موج آن (اندازه‌ای از تعداد قله‌ها و فرورفتگی‌ها) و شعاع جریان استوانه اصلی است (شکل ۱-۲).

<sup>1</sup> Lord Rayleigh



شکل ۱-۲- مرحله میانی شکستن جت و تبدیل آن به قطره.

اتمیزه کردن مایع به قطرات کوچک در قالب اسپری فرایندی مهم در سیستم‌های صنعتی و احتراق است. اتمیزه کردن یا اسپری کردن را همچنین می‌توان ریز شدن بدون تغییرات شیمیایی مخرب نیز تعریف کرد و این فرآیند بطور کلی به خصوصیات مواد (سوسپانسیون و یا مایع که قرار است اسپری شود)، طراحی دستگاه و تنظیمات مربوط به پارامترهای عملیاتی مانند فشار و دما وابسته است

[۱۶].

فرآیند اسپری کردن را می‌توان در دو مرحله خلاصه کرد:

الف) شکستن مایع به قطرات جدا از هم

ب) هدایت کردن قطرات مایع درون یک سیال مثل هوا

اسپری کردن یک مایع برای اهداف مختلفی بکار می‌رود [۶]:

۱- خنک سازی (Cooling)

۲- شستن (Washing)

۳- مرطوب ساختن (Humidifying)

۴- آغشته سازی یک محصول به یک مایع خاص

۵- آغشته سازی یک سطح به محصول مورد نظر

۶- افزایش سطح مایع برای سرعت بخشیدن به فرآیندهای انتقال گرما و یا واکنش‌های

شیمیایی

۷- منجمد سازی (تولید پودر)

دو تکنیک اصلی که در آن‌ها از اسپری کردن استفاده می‌شود عبارت است از خشک کردن با اسپری

(spray dryer) و منجمد کردن با اسپری (spray cooling system). عملی که در خشک کردن با

اسپری درجه اول رخ می‌دهد تبخیر است یعنی انتقال از فاز مایع به گاز، درحالی که در منجمد

کردن با اسپری تغییر فاز از مایع به جامد می‌باشد. این دو فرآیند، به جز در مورد جریان انرژی،

مشابه هستند. در مورد خشک کردن با اسپری، انرژی گرمایی به قطرات محلول یا مخلوط اعمال

می‌گردد و منجر به تبخیر حلال می‌گردد، در نتیجه هم انتقال انرژی و هم انتقال جرم از قطرات

صورت می‌گیرد. در منجمد کردن با اسپری، انرژی فقط از قطرات گرفته می‌شود و موجب انجماد

قطرات ذوب شده می‌گردد [۷ و ۸].

#### ۱ ۴ - اساس عملکرد یک اتمایزر

مطابق با شکل ۱-۳ که یک طرح ساده‌ای از عملکرد یک اتمایزر را نشان می‌دهد، وقتی که یک جریان سریع گاز یا هوا تزریق می‌شود و از بالای لوله عمودی عبور می‌کند، در مسیر خود باعث کاهش فشار در نقطه بالائی لوله عمودی می‌گردد. اختلاف بین فشار کاهش یافته در بالای تیوپ و فشار اتمسفر روی سطح مایع داخل مخزن سبب می‌شود که مایع داخل مخزن به سمت بالا کشیده شود و به همراه جریان هوا بصورت قطره‌های ریزی پراکنده شود [۹].



شکل ۱-۳- شمایی از اساس عملکرد یک اتمایزر.

#### ۱ ۴ - پارامترهای اتمیزه یا ریز سازی (Atomization Parameters)

عملکرد اتمایزر یا ریز کننده‌بستگی به چهار پارامتر دارد از جمله فشار پمپ، سرعت جریان خوراک، ویسکوزیته و دانسیته و کشش سطحی که در نهایت این پارامترها تاثیر مستقیمی بر اندازه قطرات دارند [۲ و ۱۰].

#### ۱ ۴ ۱ - فشار اسپری کردن یا ریز سازی (Atomization Pressure)

با یک نوع نازل و مواد اولیه، با افزایش فشار پمپ اندازه قطرات کاهش می‌یابد و زاویه اسپری (زاویه خاصی که جت مایع از اتمایزر خارج می‌شود و به طراحی نازل و نوع کاربرد وابسته است) نیز عموماً بتدریج با افزایش فشار افزایش می‌یابد که البته در برخی موارد مانند نازل‌های air-assisted قابل اغماض است که این پارامتر در سیستم‌های توربین احتراق داخلی اهمیت دارد.

#### ۱ ۴ ۲ - سرعت جریان ماده اولیه (Feed Flow Rate)

در یک فشار ثابت، در نتیجه افزایش سرعت جریان، اندازه قطرات نیز افزایش می‌یابد زیرا انرژی هیدرولیکی نازل باعث می‌شود مایع بیشتری پودر شود.

#### ۱ ۴ ۳ - ویسکوزیته و دانسیته ماده اولیه (Feed Viscosity)

اندازه قطرات رابطه مستقیمی با ویسکوزیته و دانسیته خوراک اولیه دارد. به منظور دست یابی به قطرات کوچکتر با افزایش یافتن ویسکوزیته و دانسیته، انرژی اتمیزه یا ریز سازی باید بر نیروهای بزرگتری که مانع از شکستن قطرات و تشکیل قطرات کوچکتر می‌شوند غلبه کند.

#### ۱ ۴ ۴ - کشش سطحی ماده اولیه (Feed Surface Tension)

کشش سطحی مایع نقش مهمی در میزان اتمیزه و ریز سازی ایفا می‌کند. در فرآیند پودر سازی یک مایع، باید بر کشش سطحی مایع غلبه شود بنابراین مایعی که کشش سطحی بالاتری دارد پودر شدن آن مشکل تر خواهد بود. بنابراین در برخی موارد خاص مجبور به آماده سازی

امولسیون با کمک یک امولسیفایر، یک مرحله همگن سازی قبل از اسپری کردن، هستیم تا بر کشش سطحی یک خوراک غلبه شود به خصوص در مواردی که ماده اولیه ما شامل اجزای متعددی است.

همانطور که بدان اشاره شد اتمایزر قسمتی است که موجب شکستن مایع به قطرات کوچک برای شکل گیری اسپری می گردد که با مکانیسم تئوری جت مایع قابل توجیه است، جریان مایع که توسط گریز از مرکز سرعت یافته، از هم جدا شده و یا به قطرات به شکل اشک از هم پاشیده می شود. کشش سطحی مایع باعث می گردد قطراتی که در هوا معلق هستند خود را به شکل یک کره در بیاورند.

#### ۱ ۴ - فواید ریزش

۱- ایجاد نسبت بالای سطح به حجم (مساحت سطح بزرگتر) و در نتیجه کاهش زمان تبخیر مایع یا انجماد مایع

۲- تولید ذرات مطلوب و یکنواخت از لحاظ شکل، اندازه و چگالی. بعنوان مثال در اسپری درایرها اگر ذرات بزرگ باشند به راحتی خشک نمی گردد و ذرات بسیار ریز هم به علت کوچکی با هوا بیرون برده خواهند شد [۷ و ۱۱].

## بخش ۲- سیکلون‌ها و محفظه‌های جداکننده (Chamber&Cyclone)

بطور کلی چهار نوع روش برای جمع‌آوری ذرات پودر وجود دارد: جداکننده اینرسیایی (inertial separator)، جمع‌کننده‌های پارچه‌ای (fabric collectors)، جداکننده‌های الکتروستاتیک (electrostatic separators) و اسکرابره‌های مرطوب (wet scrubbers) [۱۲].

جداکننده‌های اینرسیایی ذرات پودر را براساس استفاده از ترکیبی از نیروهای مانند گریز از مرکز، گرانشی و اینرسیایی انجام می‌دهند. این نیروها ذرات پودر را به یک منطقه که در آن نیروهای اعمال شده توسط جریان گاز حداقل است جابجا می‌کنند. گرد و غبار و ذرات پودر جدا شده توسط نیروی گرانش به داخل یک قیف هدایت شده و در آنجا به طور موقت ذخیره می‌شوند. سه نوع جداکننده اینرسیایی شامل محفظه‌های ته نشینی (expansion chambers)، محفظه‌های بافل (baffle chambers) و جمع‌کننده‌های گریز از مرکز (centrifugal collectors) مانند سیکلون‌های جداکننده می‌باشند.

درون محفظه ته نشینی یک انبساط ناگهانی رخ می‌دهد که در نتیجه آن سرعت جریان گاز یا هوای پر شده از ذرات، کاهش یافته و ذرات ته نشین می‌شوند. این سیستم طراحی بسیار ساده‌ای دارد و تقریباً از هر نوع ماده‌ای می‌توان در ساخت آن استفاده کرد. با این حال، از محفظه‌های ته نشینی به دلیل نیاز به فضای بزرگ و بهره‌وری پایین به ندرت به عنوان جمع‌کننده استفاده می‌شوند و عمدتاً در کنار سایر سیستم‌های جداکننده به منظور افزایش کارایی استفاده می‌شوند.

در محفظه‌های بافل نیز یک تغییر ناگهانی مسیر جریان گاز یا هوای حاوی ذرات را داریم. در این سیستم در نتیجه این تغییر، ذرات بزرگتر از جریان گاز یا هوا خارج شده و ته نشین می‌شوند. محفظه‌های بافل نیز به منظور افزایش کارایی سایر سیستم‌های جداکننده استفاده می‌شوند [۱۲].

امروزه سیستم‌های پودر متداول شامل دو نوع می‌باشند: سیستم جداکننده‌های سیکلونی و سیستم‌های فیلتر کارتریج. مشتریان جدید سیستم‌های پودر نیز اغلب جوانب مثبت و منفی را از هر دو نوع این سیستم‌ها مد نظر قرار می‌دهند [۱۳].

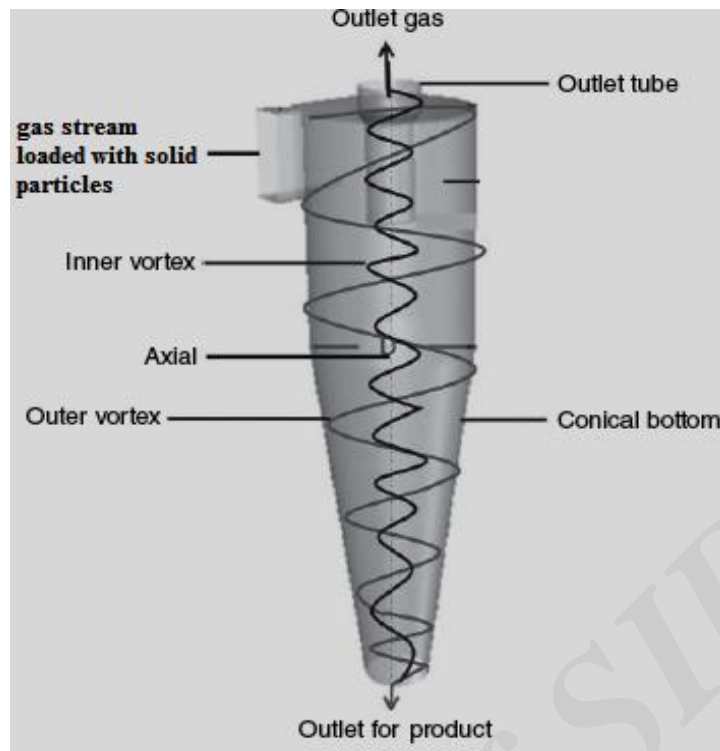
## ۲-۱- جداکننده سیکلونی (Cyclone Separator)

یک جداکننده سیکلونی وسیله یا دستگاه مکانیکی ثابتی است که با نیروی گریز از مرکز ذرات جامد را جدا می‌کند (شکل ۱-۲). بسته به فرآیند سیکلون‌های جداکننده بصورت تکی (single-cyclone) و چندتایی (multiple-cyclone) استفاده می‌شوند. این دستگاه که یکی از کارآمدترین سیستم‌های جداکننده محسوب می‌شود شامل دو بخش استوانه‌ای شکل در بالا و مخروطی شکل در پایین است. کارایی بالای این سیستم در نتیجه عدم وجود قسمت‌های متحرک در ساختارش و پایداری در برابر شرایط سخت محیطی و عملیاتی می‌باشد. بطور کلی سیکلون دارای ۵ قسمت اصلی است: ۱- بدنه: استوانه‌ای شکل بوده و قطر آن از ۱۰ میلیمتر در آزمایشگاه‌ها تا ۵۰۰۰ میلیمتر در کارخانجات و صنایع متغیر است. ۲- مخروطی ناقص: این قسمت در دنباله استوانه قرار می‌گیرد. شیب مخروطی به شکلی است که ذرات از دیواره آن به سوی پایین سر بخورند شیب مناسب معمولاً ۷ تا ۸ درجه نسبت به بدنه‌ی اصلی می‌باشد. ۳-



قسمت ورودی گاز. ۴- قسمت خروجی گاز و ۵- قسمت خروجی ذرات: این قسمت در انتها مخروط قرار گرفته و طوری ذرات را به خارج هدایت می‌کند که هوا به داخل سیکلون نفوذ نمی‌کند (شکل ۲-۱).

ذرات جامد وقتی وارد سیکلون می‌شوند با ایجاد یک مسیر گردابی شکل به طرف بخش مخروطی رانده می‌شوند و سپس در محفظه‌ای که در پایین سیکلون تعبیه شده است جمع آوری می‌شوند. جریان هوا با سرعت‌های بالا به لوله ورودی وارد می‌شود که بصورت مماس به بدنه سیکلون قرار دارد و شکل مخروطی سرعت بالای جریان هوا را القا می‌کند که در نتیجه باعث ایجاد گردابی در داخل سیلندر یا استوانه مخروطی می‌شود. در این سیستم در واقع دو نوع مسیر گردابی داریم *outer vortex* و *inner vortex*. این دو نوع مسیر گردابی به ایجاد نیروی گریز از مرکز و جدا شدن ذرات جامد و جریان هوا کمک می‌کنند و در نهایت نیز جریان هوایی که فاقد ذرات جامد است، از دهانه بالایی سیکلون خارج می‌شود. در این سیستم ذرات بزرگتر موجود در جریان هوا به طرف دیواره‌های سیکلون رانده می‌شوند که در آنجا کشش هوای در حال چرخش و بدنبال آن نیروهای گرانشی سبب می‌شوند که این ذرات به مجرای خروجی در پایین سیکلون هدایت شوند. بطور همزمان ذرات کوچکتر و سبکتر در مرکز این جریان هوای مارپیچ مانند به دام می‌افتند و یا از طریق یک خروجی در بالای سیکلون تخلیه می‌شوند.



شکل ۱-۲- شمایی از یک سیکلون جدا کننده.

بطور کلی این فرآیند به یک جریان هوای ثابت و یکنواخت و فارغ از هرگونه نوسانات و تغییراتی

در سرعت جریان نیاز دارد. ذرات ریزتر در بالای سیکلون که وارد هوای خروجی می‌شوند را می-

توان توسط یک فیلتر دیگر که بعد و یا قبل از اگزوست فن تعبیه می‌گردد جمع آوری کرد.

نتایج نشان داده است که ذرات پودری بزرگتر بار الکتروستاتیک بهتری را در مقایسه با ذرات

کوچکتر و ظریف‌تر می‌گیرند. علاوه بر این، ذرات ریزتر در مقایسه با ذرات بزرگتر بطور موثری

پمپ نشده و منتقل نمی‌شوند. بنابراین، حذف و یا جداسازی ذرات ریزتر از سیستم اسپری به

منظور بهبود بازده کلی سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است.

در مواردی که نمی‌توان از سیستم‌هایی مانند جداکننده‌های الکتروستاتیک ( electrostatic

separators)، اسکراب‌های مرطوب (wet scrubbers) و یا کیسه‌های فیلتر استفاده کرد، جدا

کننده‌های سیکلونی راه حل مناسبی در کاربردهایی مانند عملیات‌های در دماهای بالا و یا کارکردن با گازهای و یا مواد خورنده می‌باشند. سیکلون‌ها اغلب در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشاری در حدود ۵۰۰ اتمسفر نیز استفاده می‌شوند. دما و فشار پایین و ایجاد خلاء در سیستم نیز مشکلی روی کار سیکلون ایجاد نمی‌کند. به این ترتیب، این وسایل در دامنه وسیعی از دما و فشار قابل استفاده هستند. همچنین هزینه‌های نگهداری و سرمایه‌گذاری کم در مورد این سیستم‌ها از مهمترین دلایل استفاده گسترده این سیستم‌ها می‌باشد. می‌توان از بسیاری از انواع مواد در ساخت آنها استفاده کرد از جمله فولاد، فلزات ریخته‌گری، آلیاژها، آلومینیوم، پلاستیک‌ها، سرامیک‌ها و غیره.

در مواردی که گرد و غبار غیر قابل فیلتر شدن داریم نیز می‌توان از سیکلون استفاده کرد. بدین ترتیب که همراه با این ذرات گرد و غبار ریز که به سختی قابل جمع‌آوری هستند مقداری آب را نیز وارد کرده که بواسطه آب این ذرات ریز بهم برخورد کرده و توده‌های بزرگتری را تشکیل می‌دهند. سپس با ایجاد حرارت آب را از سطح این ذرات بزرگتر تبخیر کرده و در نتیجه ذرات بزرگتر را به سهولت جمع‌آوری می‌کنند.

در شکل ۲-۲ انواع سیکلون‌های صنعتی با کاربردهای مختلف و اندازه‌های متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- انواع جدا کننده‌های سیکلونی موجود در صنایع.

کاربردهای صنعتی مهم سیکلون: در واحدهای تولید کننده مواد شوینده، در فرآیندهای خرد کردن، جداسازی و عملیات تکلیس مواد معدنی و صنایع شیمیایی، در واحدهای تولید مواد غذایی، تجهیزات نمونه برداری، سیستم‌ها و ماشین‌های تمیز کننده و غیره. همچنین سیکلون‌ها برای طبقه بندی مواد جامد بر اساس برخی مشخصه‌ها مانند جرم، چگالی، اندازه و یا شکل نیز استفاده می‌شوند [۱۲-۱۵]. از سیکلون‌های غبارگیر در صنایع با هدف کاهش آلودگی محیط، بازیابی محصول با ارزش، حفظ سلامتی کارکنان و یا جمع آوری محصولات پودری استفاده می‌شود. قابلیت سیکلون‌های غبارگیر در جمع آوری غبارات سبب گردیده تا این ماشین آلات در صنایع تولید خوراک دام و طیور، صنایع غذایی و تبدیلی، صنایع دارویی و شیمیایی و بسته

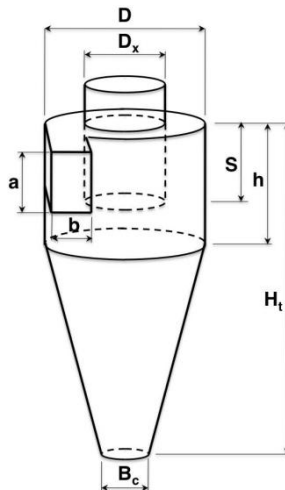
بندی اهمیت ویژه‌ای پیدا کنند. یکی از ویژگی‌های مهم سیکلون‌های غبارگیر نیاز به حداقل تعمیرات و نگهداری در این ماشین آلات به سبب نبود قطعات متحرک در آنها می‌باشد که خود امتیازی برای اکثر صنایع است.

در فرآیندهای کشاورزی و ماشین‌های پنبه پاک کنی از طرح‌های سیکلونی 1D3D، 2D2D، 1D2D استفاده می‌شود که این سه طرح سیکلونی بطور کلی از معروفترین انواع طرح‌های سیکلونی می‌باشند. در این طبقه بندی از طرح‌های سیکلونی D به قطر بشکه سیکلون اطلاق می‌شود و اعداد به طول بشکه و قسمت مخروطی سیکلون اشاره دارند. بعنوان مثال در 2D2D طول بشکه و مخروط دو برابر قطر بشکه است و در 1D3D طول و قطر بشکه یکی می‌باشد و طول مخروط ۳ برابر قطر بشکه می‌باشد. در این میان سیکلون‌های 1D3D برای جمع آوری ذرات ریز گردو غبار بسیار کارآمدتر از سیکلون‌های 2D2D می‌باشند و سیکلون 1D2D افت فشار کمتری دارد.

پارامترها و فاکتورهای مختلفی بر روی کارایی سیکلون تاثیر می‌گذارند که از آن جمله می‌توان به ابعاد سیکلون (شکل ۲-۳) (قطر سیکلون، ارتفاع a و عرض b ورودی، قطر  $D_x$  و طول S لوله خروجی گاز، ارتفاع استوانه h، ارتفاع کل سیکلون  $H_t$ ، قطر نوک مخروط  $B_c$ )، خصوصیات ذرات (دانسیته، شکل، قطر و چگونگی توزیع ذره)، خصوصیات گاز (سرعت، فشار، دما، تراکم و ویسکوزیته) و دیگر فاکتورهایی نظیر ناهمواری دیواره سیکلون و شکل و مسیر vortex اشاره

کرد. البته مطالعات نشان می‌دهد که هندسه سیکلون تاثیر بسزایی در کارایی سیکلون دارد

(شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- پارامترهای ابعادی در یک سیکلون جداکننده.

بر اساس مطالعات انجام شده افزایش یافتن طول سیکلون تا ۵/۵ برابر قطر سیکلون تاثیر مثبتی

بر کارایی سیکلون دارد و در بیشتر از این مقدار کارایی سیکلون کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

هدف از اندازه گیری کارایی سیکلون جدا کننده نسبت به سیستم‌های اسپری پودر، یافتن نسبت

ذرات پودر شده جدا شده است. به عبارت دیگر چه درصدی از ذرات پودری بزرگتر در پایه

سیکلون جدا شده‌اند و برای اسپری دوباره به مدار بر می‌گردند و همچنین چه درصدی از ذرات

پودری کوچکتر در بالای سیکلون جدا شده‌اند و در نهایت توسط فیلتر جمع آوری شده است

[۱۶].

یکی از مواردی که به شدت روی راندمان دستگاه‌های جداساز سیکلونی تاثیر می‌گذارند میزان

افت فشار موجود در این دستگاه‌ها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افت فشار سیکلون با سرعت-

های ورودی تغییر می‌کند نه با قطر سیکلون و سیکلون‌های کوچکتر نسبت به سیکلون‌های بزرگتر کارایی بیشتری را در جمع‌آوری ذرات با گرد و غبار دارند. عوامل ایجاد کننده افت فشار در سیکلون‌ها از قرار زیرند:

۱. افت فشار ناشی از تشکیل جریان گردابی (Vortex)
  ۲. افت فشار ناشی از برخورد و اصطکاک با دیواره
  ۳. افت فشار ناشی از انبساط گاز در ورودی به سیکلون
  ۴. افت فشار به خاطر انقباض نهایی جریان گاز برای ورود به لوله خروجی گاز خالص شده.
- یک سیکلون در حقیقت یک محفظه ته نشین سازی است که شتاب جاذبه با شتاب سانتریفوژی جایگزین شده است. مقدار نسبت شتاب سانتریفوژی به شتاب جاذبه، بستگی به قطر سیکلون دارد. برای سیکلون‌های استوانه‌ای با قطرهای خیلی بزرگ شتاب سانتریفوژ در حدود ۵ برابر شتاب جاذبه است و در مورد سیکلون‌های استوانه‌ای با قطر کوچک شتاب سانتریفوژی در حدود ۲۰۰۰ برابر بزرگتر از شتاب جاذبه می‌باشد. نیروی وارد شده بر ذرات بزرگتر مقدار بیشتری می‌باشد و لذا ذرات بزرگتر با چرخش کمتری در سیکلون به پایین سیکلون می‌رسند.

مقطع ورودی به سیکلون‌ها معمولاً به شکل مستطیل یا دایره ساخته می‌شود و در بعضی موارد نیز با توجه به نوع فرآیند، از سیکلون‌هایی با مقطع ورودی بیضی شکل نیز استفاده می‌شود. هر چه مقطع ورودی سیکلون‌ها کوچکتر باشد، ذرات ریز ساده‌تر می‌توانند از جریان گاز جدا شوند اما با این کار ظرفیت سیکلون‌ها کاهش می‌یابد. در چنین مواردی که نیاز است ذرات ریز از جریان

گاز جدا شوند باید از تعداد زیادی سیکلون که به صورت موازی در داخل یک Box قرار گرفته‌اند استفاده شود (multiple-cyclone). با این کار ظرفیت عملیاتی سیکلون‌ها که به واسطه کاهش سطح مقطع ورودی سیکلون کاهش یافته است افزایش می‌یابد. در مورد سیکلون‌های موازی باید به تعداد این سیکلون‌ها، راندمان جداسازی، هزینه ساخت، هزینه عملیاتی و مقایسه این سیکلون‌ها با سایر وسایل جداکننده گاز-جامد توجه کرد زیرا در بعضی از موارد استفاده از multiple-cyclone ها مقرون به صرفه نمی‌باشد. همانطور که بدان اشاره شد حرکت مواد در داخل سیکلون با افت فشار همراه می‌باشد که این افت فشار معمولاً توسط یک کمپرسور یا Blower تامین می‌شود. سیکلون‌ها را از نظر چگونگی قرار گرفتن Blower یا کمپرسور نسبت به سیکلون نیز به دو دسته تقسیم بندی می‌کنند:

۱. سیستم‌هایی که کمپرسور قبل از سیکلون قرار دارد.

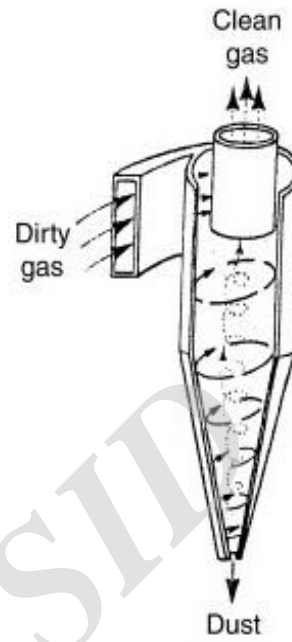
۲. سیستم‌هایی که کمپرسور بعد از سیکلون قرار دارد.

لازم به ذکر است که در اکثر موارد کمپرسور را بعد از سیکلون قرار می‌دهند زیرا وجود ذرات جامد در جریان ورودی به سیکلون روی کمپرسور اثر منفی می‌گذارد.

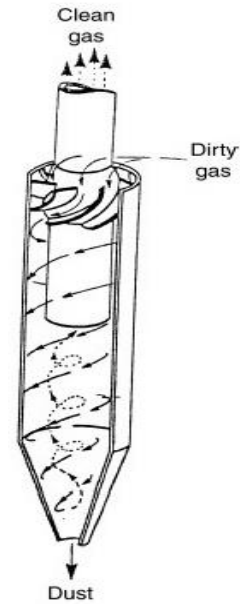
سیکلون‌ها را از نظر ورود گاز به محفظه نیز به سه دسته تقسیم بندی می‌کنند:



۱ - سیکلون مماسی (فوقانی)

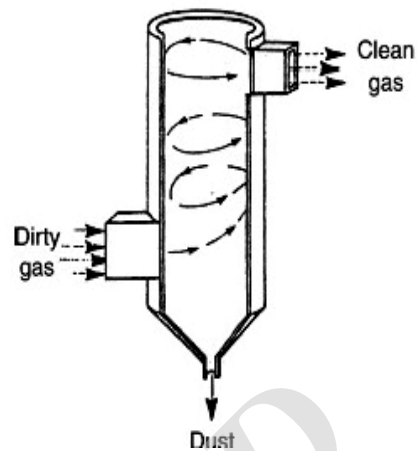


۲ - سیکلون محوری



Archive of SID

### ۳- سیکلون تحتانی



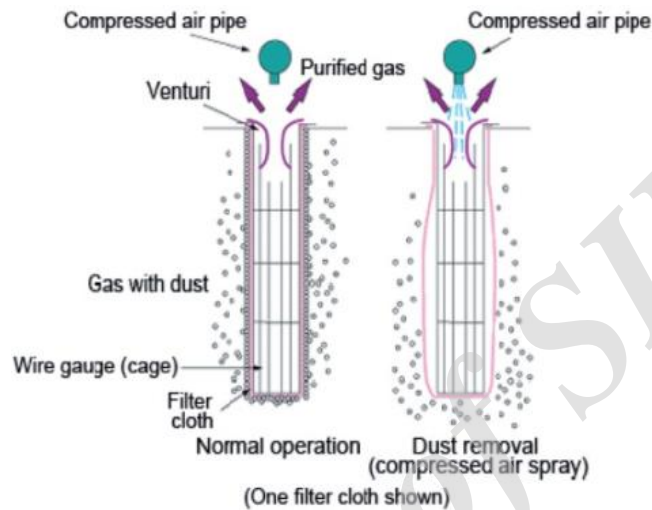
در سیستم‌های اسپری درآینگ (spray drying) یا خشک کن‌های پاششی دو سیستم برای جداسازی محصولات استفاده می‌شود. محفظه خشک کن پاششی عموماً دارای یک انتهای مخروطی شکل است که به منظور تسهیل جمع آوری پودر می‌باشد. شایان ذکر است که در طرح دستگاه پودر میکرونیزه حاضر نیز این قسمت را داریم ولی بدون ایجاد گرما. در خلال جدایی اولیه در هردو سیستم (spray drying) و (دستگاه پودر میکرونیزه مورد مطالعه در این طرح) عملاً مقداری پودر خشک در پایه خشک کن جمع می‌شود و الباقی یعنی غبارها و ذرات ریزتر وارد جداکننده سیکلونی می‌شوند و این قسمت دوم جداسازی محصولات پودر شده است.

### ۲ ۴- فیلتر کیسه‌ای (Bag Filter)

فیلتر کیسه‌ای نیز قسمت دیگری از این ماشین پودر ساز است که این قسمت را در دستگاه‌های اسپری درآیر نیز می‌توان دید (شکل ۲-۴). این فیلتر که در واقع یک محفظه فلزی است که به جداکننده سیکلونی متصل است و باقی ذرات فرار کرده از سیکلون در این قسمت جمع می‌شود.

فیلترها را معمولاً به یک کمپرسور هوا برای ایجاد یک پالس شدید نیز مجهز می‌کنند تا با ایجاد یک موجی از هوای فشرده در کسری از ثانیه، ذرات چسبیده به آن جدا شده و جمع‌آوری شوند

[۱۷].

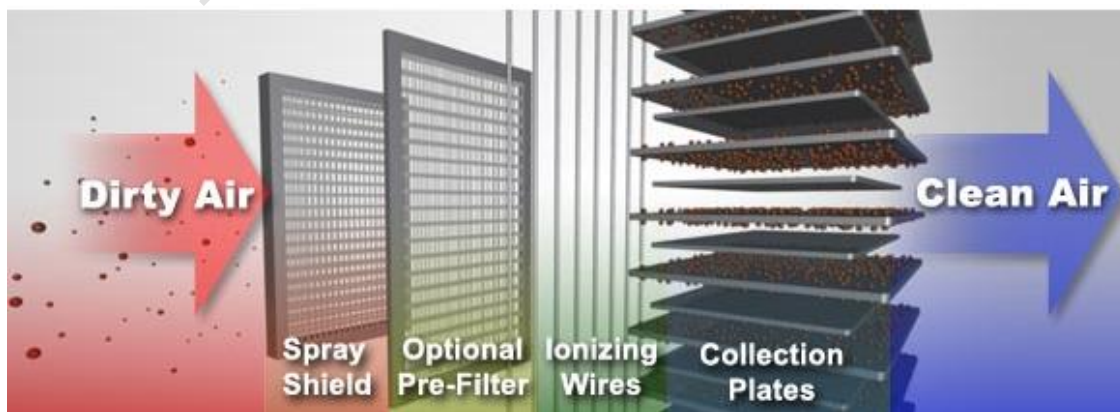


شکل ۲-۴- پالس جت برای پاکسازی سطح فیلترهای پوشیده شده از غبار.

## ۲ ۴- جمع‌کننده‌های الکتروستاتیک (Electrostatic Precipitator)

جمع‌کننده الکتروستاتیکی از جمله روش‌هایی است که در دستگاه‌های اسپری درایر به منظور

جمع‌آوری ذرات بر اساس نیروهای الکتروستاتیک استفاده می‌شود (شکل ۲-۵) [۱۸].



شکل ۲-۵- جمع‌کننده‌های الکتروستاتیک.

این سیستم شامل یک سیم تخلیه و صفحات جمع کننده (collecting plates) است. با اعمال یک ولتاژ بالا به سیم تخلیه، یک میدان الکتریکی بین سیمها و صفحات جمع کننده ایجاد می‌شود و این ولتاژ بالا هوای اطراف سیم را یونیزه می‌کند. همچنان که هوای حاوی ذرات محصول جریان بین صفحات جمع کننده و سیمها پیدا می‌کند، ذرات موجود در این جریان هوا باردار می‌شوند. سپس نیروی کولن ناشی از میدان الکتریکی باعث می‌شود که ذرات باردار بر روی صفحات جمع کننده جمع آوری شوند و از جریان هوا جدا شوند. ذرات جمع آوری شده در صفحات توسط اعمال ضربه به صفحات، خراش دادن و یا شستشو با آب از صفحات حذف شده و وارد یک قیف می‌شوند.

#### ۲ ۴ - اسکرابره‌های مرطوب (Wet Scrubbers)

در اسکرابر هایمرطوب از یک مایع که معمولاً آب است برای جداسازی ذرات از جریان گاز یا هوا استفاده می‌شود و تماس بیشتر جریانهای گاز و مایع منجر به حذف بیشتر ذرات از جریان گاز می‌شود.

بطور کلی انتخاب تجهیزات جداسازی ذرات بر اساس عوامل مختلف از جمله راندمان جمع آوری،

ویژگی‌های عملیاتی، هزینه و فضای مورد نیاز انجام می‌گیرد [۱۶ و ۱۹].

### بخش ۳- نازل

امروزه تکنیک‌های بسیاری به منظور تولید اسپری در صنعت استفاده می‌شود و در این میان نوع نازل و چگونگی عملکرد آن در طی فرآیند اسپری مایع بسیار مورد توجه است. یک نازل دستگاهی دقیق است که پراکندگی مایع را در یک اسپری تسهیل می‌کند. بطور کلی نازل‌ها برای سه هدف استفاده می‌شوند: ۱- توزیع یک مایع بر یک ناحیه ۲- افزایش سطح مایع (خرد و یا ریز کردن قطرات) ۳- ایجاد نیروی ضربه‌ای روی سطح جامد.

نازل‌ها را می‌توان با توجه به نوع انرژی مورد استفاده برای القاء بی‌ثباتی در مایع و تبدیل آن به قطره طبقه‌بندی کرد. برای مثال، انرژی فشار برای اتمایزر فشاری، انرژی گازی / مایع برای نازل اتمایز کننده دو سیالی، انرژی گریز از مرکز برای نازل دوار یا چرخان و انرژی ارتعاشی برای نازل مافوق صوت و یا صوتی. بطور کلی انواع مختلف نازل‌ها برای اهداف خاص توسعه یافته است و به منظور تولید محصولات با کیفیت بالا و مقرون به صرفه، انتخاب نازل مناسب بسیار حائز اهمیت است. در ادامه به انواع نازل‌های تجاری اشاره شده است [۲۰ و ۲۱].

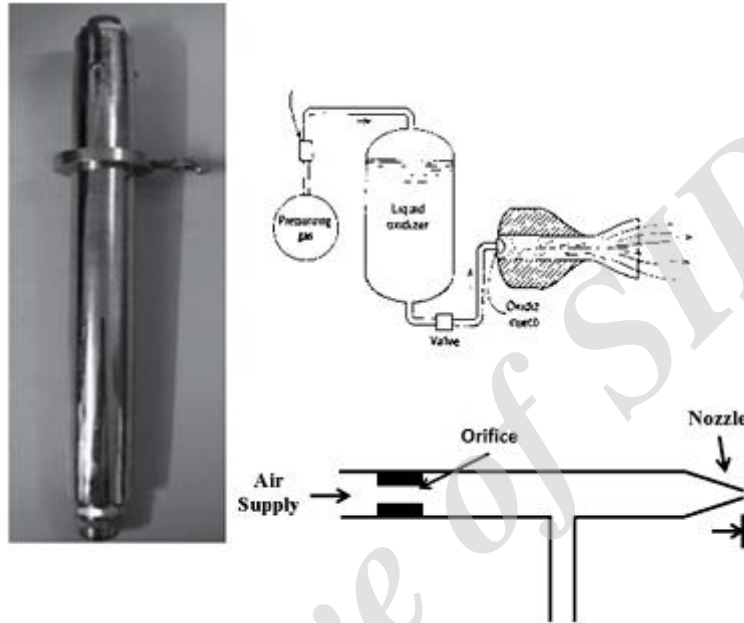
#### ۳-۱- انواع نازل

۳-۱-۱- نازل‌های فشاری یا هیدرولیک (Pressure Nozzles) (ریز کردن توسط فشار)

(شکل ۳-۱): این نوع نازل از جمله ساده‌ترین نازل‌ها است. در این سیستم یک دهانه به داخل

یک مخزن باز شده و مایع تحت فشار اسپری می‌شود و در واقع انرژی فشار به انرژی جنبشی

تبدیل می‌شود الگوی اسپری، سرعت جریان و زاویه اسپری وابسته به مشخصات لبه دهانه ورودی و یا orifice و فشار داخلی مخزن می‌باشد. شایع ترین اتمایزر مورد استفاده برای خشک کردن با اسپری نیز این نوع نازلها می‌باشد.



شکل ۳-۱- نازل فشاری یا هیدرولیک.

این نوع نازلها به طور کلی تولید پودر ریزتر با ریزش بهتری نسبت به اتمایزر دوار می‌کنند. میانگین اندازه ذرات عموماً بین  $120-250 \mu\text{m}$  می‌باشد که این پارامتر با ویسکوزیته ماده و خوراک اولیه رابطه مستقیم دارد و با فشار اتمیزه شدن رابطه معکوس دارد. در استفاده از این نازلها استفاده از ماده اولیه با ویسکوزیته کم توصیه شده است. برای تامین جریان بالا (در حد چند تن) از چندین نازل کنار هم نیز استفاده می‌شود که البته منجر به تولید رنج گسترده‌تری از اندازه ذرات نیز می‌شود. به خاطر اعمال چنین فشار بالایی، خصوصاً هنگام کار با مواد خورنده، نازل در معرض فرسایش خواهد بود. نازل‌های فشاری مورد استفاده در خشک کردن با اسپری،

نازل "Vortex" نامیده می‌شوند زیرا باعث چرخش مایعی می‌گردند که از آن عبور داده می‌شود.

محدوده فشار برای نازل فشاری مورد استفاده در خشک کردن با اسپری از حدود ۲۵۰ PSI

(۱۷,۴ بار) تا حدود ۱۰۰۰۰ PSI (۶۹۰ بار) می‌باشد. از محدودیت‌های این نازل‌ها این است که

در مقایسه با دیگر نازل‌ها در سرعت بالای خوراک ذرات درشت‌تر بوده و همگنی محصولات پودر

نیز کمتر است [۱، ۷ و ۲۲].

### ۳-۱-۴ - نازل‌های اغتشاشی (Turbulence Nozzles):

در این نوع نازل‌ها در ضمن حرکت مایع به سمت مخزن قبل از دهانه یا orifice یک حرکت

چرخشی اجزا رو داریم و بنابراین به دلیل نیروی گریز مرکز به محض ترک کردن لبه دهانه یک

شکل مخروطی دارد (شکل ۳-۲). بر اساس طراحی این نازل قطرات تولید شده به سطح بیرونی

مخروط محدود می‌شوند (hollow cone spray) و یا بطور عادلانه برای پر کردن کل حجم

مخروط توزیع می‌شوند (full cone spray) [۶].



شکل ۳-۲-نازل اغتشاشی.

### ۳-۱-۴ - نازل‌های چرخان (Rotary Nozzle):

در این سیستم عمل ریز کردن توسط انرژی گریز از مرکز که با استفاده از انرژی چرخش با سرعت بالای چرخش ( $200\text{ m/s}$ )، مایع بالک را به قطرات تقسیم می‌کند (شکل ۳-۳) [۷].



شکل ۳-۳- نازل چرخان.

این سیستم برای حجم‌های بالای محصول مناسب می‌باشد و با بکارگیری این مجموعه از چرخ دوار، میزان ۲۷ تن در هر ساعت می‌توان اسپری کرد. مزایای استفاده از نازل‌های دوار عبارتند از: انعطاف پذیری بالا و سهولت عملیات، سازگاری با فشار پایین مایع، فاقد مشکلات انسداد، تولید قطراتی با اندازه‌های یکنواخت و سهولت کنترل اندازه قطرات از طریق تنظیم سرعت چرخش.

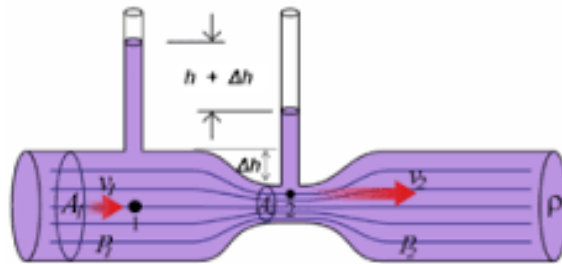


با این وجود دارای معایبی هم می‌باشد از جمله اینکه: مقدار زیادی ذرات ریز تولید می‌کند که می‌توانند ایجاد آلودگی کند، هزینه بالای نگهداری، دشواری استفاده برای مواد چسبناک و یا موادی با ویسکوزیته بالا و اینکه نمی‌تواند در خشک کن‌های افقی مورد استفاده قرار گیرد. لذا به خاطر مشکلات و هزینه‌های مرتبط با نازل چرخان در بخش صنعت علاقه به جایگزینی نازل فشاری وجود دارد. در پودرکننده‌های چرخشی از یک دیسک با سرعت چرخش بالا و جام یا چرخ برای تخلیه مایع در سرعت بالا به محیط استفاده می‌شود و تشکیل یک اسپری مخروطی میان تهی را می‌دهد. اسپری دایر و اسپری رنگ از متداول ترین و مهمترین کاربردهای این تکنولوژی هستند. میانگین اندازه ذرات بین  $120-30 \mu\text{m}$  می‌باشد که این اندازه با ویسکوزیته ماده اولیه نسبت مستقیم و با سرعت چرخ و قطر چرخ رابطه معکوس دارد.

### ۳-۴ - ونتوری نازل (Venturi Nozzle):

این نوع نازل که به آن نازل مکند (aspirator nozzle) نیز می‌گویند، اولین بار در اواخر قرن ۱۹ توسط دکتر توماس دوویل بیس<sup>۱</sup> از دانشگاه اوهایو اختراع شد. از این نازل برای تولید یک اسپری ریز و نازک از مایع بر اساس اثر ونتوری (venturi effect) استفاده می‌شود. این اثر با کاهش فشار در سیال زمانی که سیال از یک لوله تنگ عبور می‌کند قابل حس و اندازه گیری می‌باشد (شکل ۳-۴) [۲۳].

<sup>1</sup>Thomas Devilbiss



شکل ۳-۴- اثر ونتوری.

### ۳-۴-۵ - نازل‌های ضربه‌ای (Impact Nozzles):

در این نوع نازل، اسپری مورد نظر تولید ضربه‌ای از جت مایع بر روی سطح طراحی شده را می‌کند. سپس جت مایع ابتدا به یک لایه مایع تبدیل می‌شود و سپس به قطرات با الگوی اسپری مورد نظر می‌شکند (شکل ۳-۵) [۶].

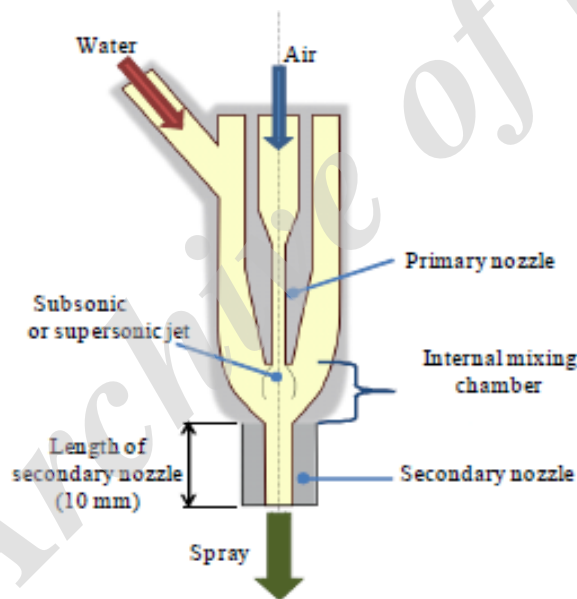


شکل ۳-۵- نازل ضربه‌ای و شمایی از طرح اسپری حاصل از آن.

### ۳-۴-۶ - نازل کمک-هوایی (Air-Assisted Nozzles):

با استفاده از این نازل‌ها قطرات خیلی نازک و ریزی را خواهیم داشت. در این نوع نازل دو نوع آرایش داریم که عمدتاً در نازل‌های دو-سیال وجود دارد. آرایش مخلوط شدن داخلی یا ترکیب داخلی که در آن مایع و هوا قبل از خروج از دهانه یا روزنه خروجی در داخل نازل مخلوط می‌-

شوند و قطرات عمدتاً یک انرژی جنبشی از هوا بدست می‌آورند و یک الگوی اسپری مخروطی کامل را داریم. در فرم دیگری که آرایش خارجی یا ترکیب خارجی است، هوا با سرعت بالا در بیرون دهانه خروجی با مایع برخورد می‌کند. از مزیت‌های آرایش خارجی این است که چون هیچ ارتباط داخلی بین هوا و مایع وجود ندارد مشکلات برگشت فشار را نداریم اما برای داشتن نتایج یکسان در مقایسه با آرایش داخلی نیاز به سرعت یا میزان جریان هوا بیشتری داریم. بطور کلی هر دو نوع آرایش می‌توانند گزینه مناسبی برای مایعاتی با ویسکوزیته بالا باشند. شمایی از یک نازل کمک- هوایی با آرایش ترکیب داخلی در شکل ۳-۶ نشان داده شده است [۲۴].



شکل ۳-۶- شمایی از یک air-assisted nozzle (با آرایش ترکیب داخلی).

### ۳-۱-۷ - نازل ایر بلاست (Air-Blast Nozzles):

این سیستم شباهت بسیاری به نازل کمک-هوایی دارد و تقریباً هر دو را در یک طبقه بندی قرار می‌دهند. البته مهمترین تفاوت آنها این است که در اولی یعنی air-assisted مقدار فشار کمتری در سرعت خیلی بالا استفاده می‌شود ولی در air-blast مقدار هوای بیشتری در سرعت‌های کمتر بکار برده می‌شود بنابراین air-blast نازل مناسبی برای اتمایز کردن مایعات سوختی در سیستم-های احتراق جریان پیوسته (continuous-flow combustion system) مانند توربین‌های گازی و همچنین سیستم‌های پخش سموم در مزارع و باغات می‌باشد. در معمولترین فرم از این نوع نازل، مایع ابتدا بصورت یک مخروطی نازک منتشر شده و سپس در معرض جریان هوا با سرعت بالا قرار می‌گیرد. در طرح‌های مختلف موجود از این نوع نازل هدف اساسی گسترش ذرات ایجاد شده در بیشترین فضای مورد نظر می‌باشد (شکل ۳-۷) [۲۵].



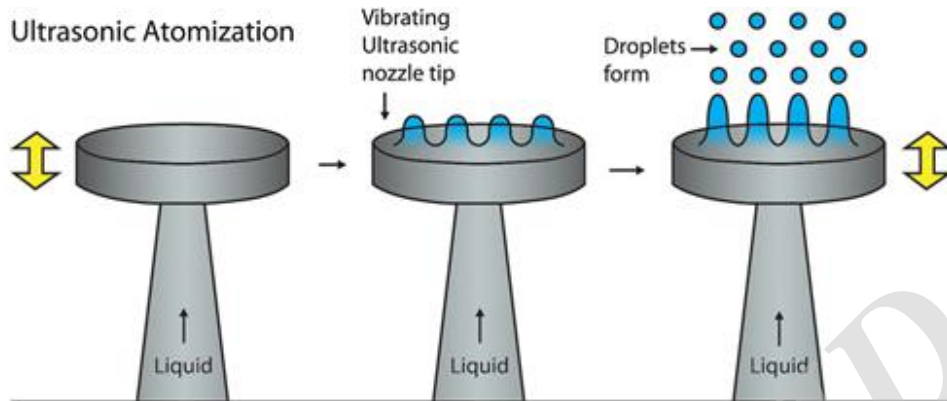
شکل ۳-۷- ایر بلاست نازل.

### ۳-۱-۸ - نازل فراصوت (Ultrasonic Nozzle):

نازل ما فوق صوت یا فرا صوت دستگاهی الکترومکانیکی است که بر اساس ارتعاش در فرکانس بسیار بالا عمل می‌کند. در شکل ۳-۸ شمایی از عملکرد این نازل‌ها نشان داده شده است.

ارتعاش یک کریستال پیزوالکتریک باعث ایجاد امواج مویرگی در فیلم مایع روی سطح نازل می-

شود [۱ و ۲۶].



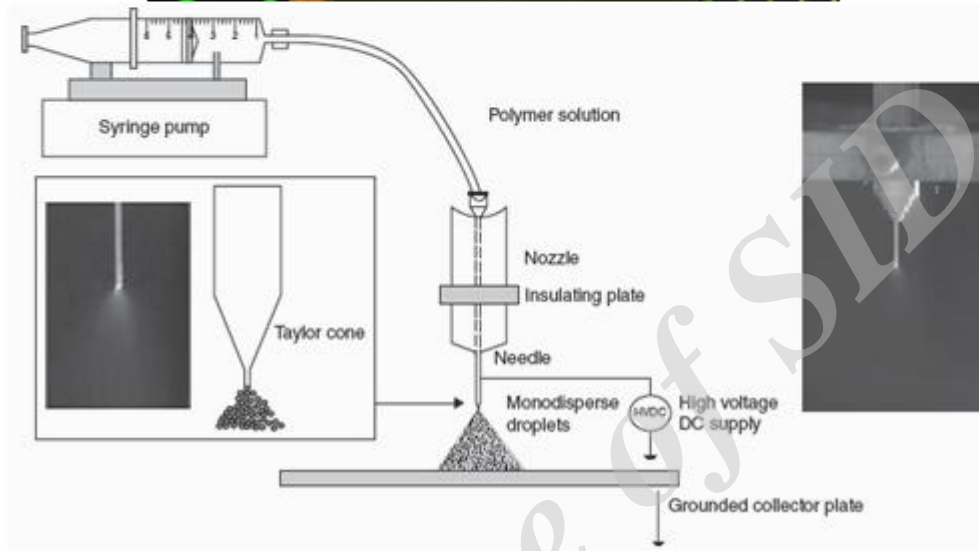
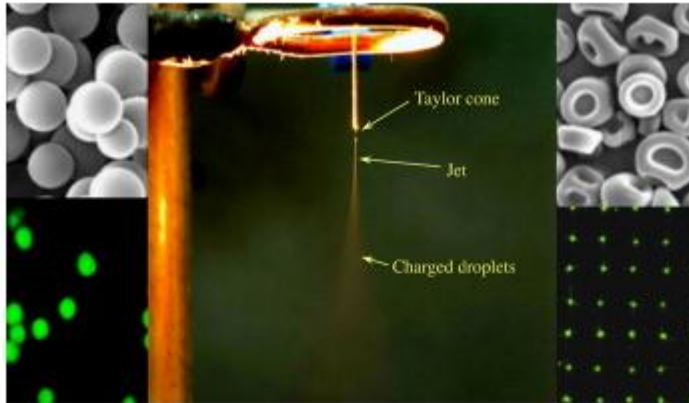
شکل ۳-۸- شمایی از عملکرد نازل فراصوتی.

این نوع از اسپری نازل با بهره‌گیری فرکانس بالا (۲۰-۱۸۰ کیلو هرتز) قطراتی با اندازه کوچکتر و با توزیع یکنواخت‌تری در مقایسه با نازل‌های فشاری تولید می‌کنند. علاوه بر این بحث گرفتگی نازل‌ها در حین عملیات نیز در این نوع از نازل‌ها کمتر است. این نوع نازل‌ها عمدتاً برای ترکیبات زیستی مانند سلول‌های پروبیوتیک و بطور کلی ترکیباتی که ویسکوزیته کمی دارند استفاده می‌شوند

### ۳-۱-۹ - نازل الکترو هیدرودینامیک (Electrohydrodynamic Nozzle):

یکی از روش‌هایی که اخیراً برای اسپری یک خوراک مایع استفاده می‌شود که به الکترواسپری یا الکترو هیدرودینامیک معروف است، براساس شارژ الکترواستاتیک عمل می‌کند. در شکل ۳-۹ تصویری شماتیک از عملکرد این نازل نشان داده شده است. در الکترواسپری، پتانسیل الکتریکی

اعمال شده به یک سوزن بار الکتریکی را در سطح مایع سبب می‌شود [۱ و ۲۷].



شکل ۳-۹- مکانیسم عملکرد یک الکترواسپری.

شدت بالای جریان الکتریکی اعمال شده بین دو الکترود با بار مخالف در یک سیستم الکترو اسپری تولید قطراتی با توزیع اندازه ذرات کم را قادر می‌سازد. به سبب تنش الکتریکی ایجاد شده، قطرات از سوزن دور می‌شوند. نیاز به حلال‌ها به منظور آماده سازی خوراک اولیه و میزان جریان کم، استفاده تجاری این نوع نازل‌ها را محدود می‌کند.

بطور کلی انتخاب نازل‌ها براساس خصوصیات محتوای اسپری، خواص پودر مورد نظر و ظرفیت خود نازل و ظرفیت اتمایزر صورت می‌پذیرد.

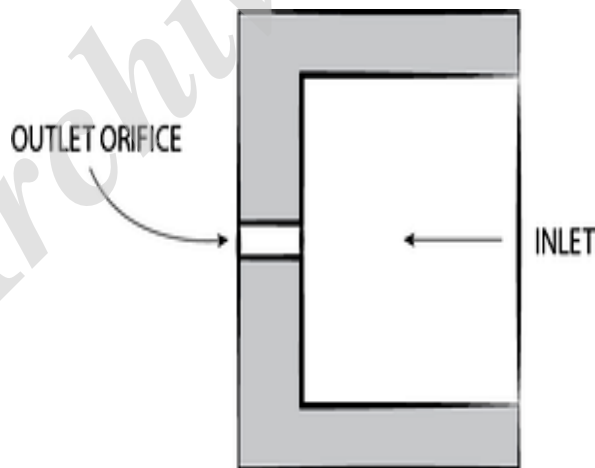
نازل‌ها می‌توانند دارای یک یا چندین خروجی باشند و بر این اساس طبقه بندی دیگری نیز وجود دارد که در ادامه اشاره شده است.

### ۳ ۴ - طبقه بندی نازل‌ها بر اساس تعداد سیال و ساختار خروجی

#### ۳ ۴ ۱ - نازل اتمایزکننده تک-سیال (Single-Fluid Nozzle):

نازل‌های تک-سیال انرژی جنبشی مایع را برای شکستن مایع و تبدیل آن به قطره استفاده می‌کنند. همچنان که فشار مایع افزایش می‌یابد، میزان جریان از طریق نازل‌ها افزایش یافته و اندازه قطره‌ها کاهش می‌یابد. بسیاری از تنظیمات نازل‌های تک-مایع بسته به ویژگی‌های اسپری مورد نظر انجام می‌شود [۲۸].

#### ۳ ۴ ۱ ۱ - نازل تک-سیال (مسطح-دهانه) (Plain-Orifice Nozzle):

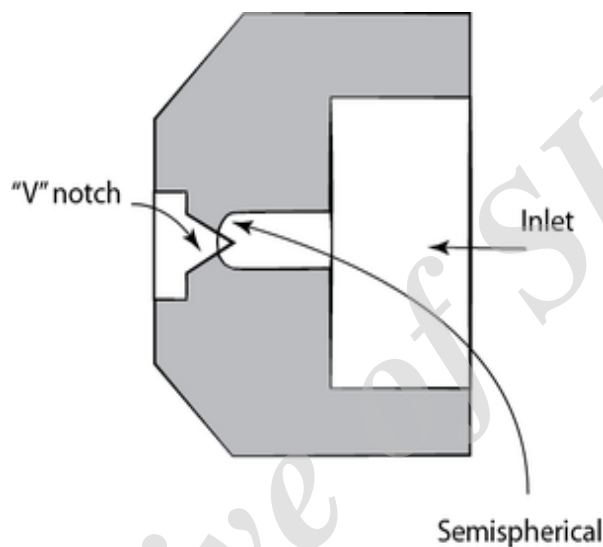


شکل ۳-۱۰- شمایی از یک نازل مسطح-دهانه (Plain-orifice nozzle).

ساده‌ترین نازل تک-سیال، نازل با دهانه مسطح می‌باشد که در شکل ۳-۱۰ بطور شماتیک نشان داده شده است. این نازل حتی اگر جریان کمی از مایع وجود داشته باشد می‌تواند آن را

اتمیزه نماید. بدلیل سادگی دارای کاربردهای زیادی مانند: شیلنگ‌های باغبانی، دوش‌های حمام و موارد صنعتی مانند پرینترهای جوهر افشان و کاربردهای پیچیده‌تر آن در موتورهای دیزل و راکت می‌باشد. این قطعه توسط ماشین کاری با دریل و یا لیزر قابل تولید است [۲۹].

۳ ۴ ۱ ۴ ۳ نازل تک-سیال (دهانه V شکل) (V-Shaped-Orifice Nozzle):



شکل ۳-۱۱- شمایی از یک نازل دهانه V شکل (V-Shaped-orifice nozzle).

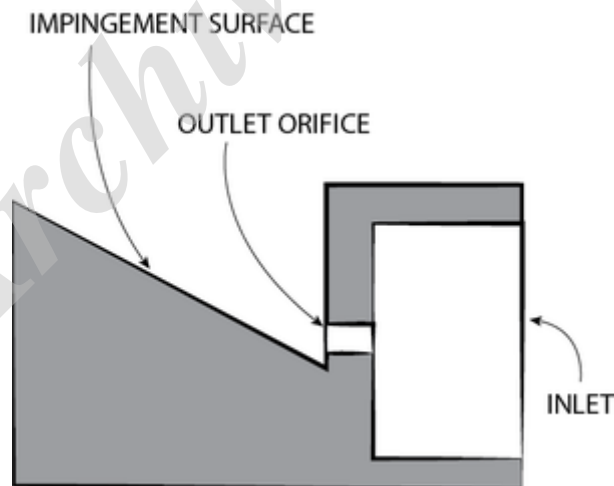
این نوع نازل دارای ورودی به شکل نیم کره و خروجی به شکل V بوده که باعث پخش شدن جریان در راستای این محور V شکل می‌شود (شکل ۳-۱۱) و در نتیجه جت مایع نامتقارنی را داریم [۳۰].



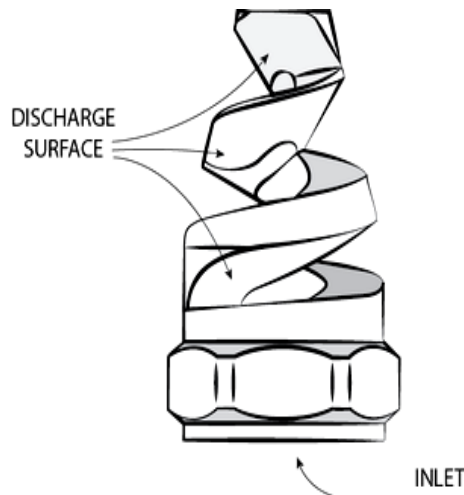
### ۳-۴-۳ - نازل تک-سیال (سطح-برخورد) (Surface-Impingement Single-Fluid Nozzle)

(Nozzle):

در این نوع نازل ایجاد جریان از مایع بر روی یک سطح، فیلمی از مایع روی آن سطح تشکیل می‌دهد که شکست آن فیلم به قطرها را تسهیل می‌کند. این نوع نازل در رنج گسترده‌ای از کاربردها مانند علف‌کش‌های کشاورزی استفاده می‌شود (شکل ۳-۱۲). سطح برخورد می‌تواند بر روی یک ماریج تشکیل شود و یک الگوی مخروطی اسپری را داشته باشیم (شکل ۳-۱۳). این طراحی ماریج بطور کلی ذراتی با اندازه‌های کوچکتری را سبب می‌شود. از جمله کاربردهای رایج این سیستم در آتش‌نشانی است (جایی که مخلوطی از قطرات متراکم اجازه نفوذ اسپری را به جریان‌های گرمایی قوی را می‌دهد) [۳۱].



شکل ۳-۱۲- نازل اسپری سطح-برخورد.



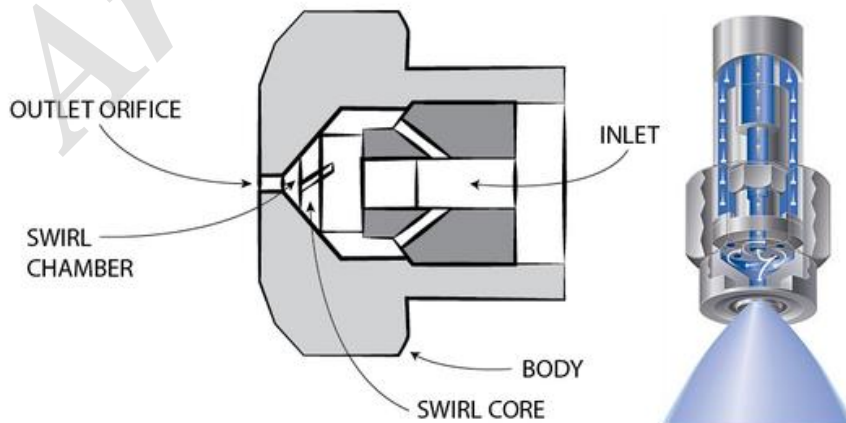
شکل ۳-۱۳- نازل اسپری مارپیچی.

### ۳-۴-۴ - نازل تک-سیال (فشار-چرخش) (Pressure-Swirl Single-Fluid)

#### : (Spray Nozzle)

این نازل دستگاهی با کارایی بالا در تولید قطراتی با اندازه کوچک می‌باشد. یک هسته ثابت حرکت چرخشی را القا می‌کند که باعث چرخش مایع موجود در محفظه چرخش می‌شود (شکل

۳-۱۴).



شکل ۳-۱۴- نازل تک-سیال (فشار-چرخش).

هوا و یا سایر گازها می‌توانند به داخل این محفظه کشیده شده و تولید یک هسته هوا در داخل مایع در حال چرخش را کنند. این نازل در اسپری درایرها و تبخیر کننده‌های سرمایشی استفاده می‌شود [۳۲].

### ۳ ۴ ۴ - نازل اتمایز کننده دو-سیال (Two-Fluid Nozzle Atomizer):

در یک نازل دو سیال یا نازل پنوماتیک (ریز کردن توسط انرژی جنبشی) مواد خام مایع و هوای فشرده (یا بخار) ترکیب می‌شود. دو نوع اتمایز هوایی air-blast و air-assisted هر دو در این طبقه بندی بر اساس تعداد خروجی قرار می‌گیرند. این طرح برای بهره‌گیری از انرژی گاز فشرده شده برای تبدیل کردن مایع به پودر است که برای طیف وسیعی از مواد خورنده به کار می‌رود. مزیت استفاده از نازل دو سیال توانایی آن برای تولید ذرات بسیار ریز و قابلیت استفاده برای ماده اولیه یا خوراکی با ویسکوزیته بالا می‌باشد. همچنین این نوع نازل‌ها در مقایسه با نازل‌های تک-سیال پودر نرم و خوبی را با مقدار فشار به نسبت کمتری تولید می‌کنند. با این حال، به دلیل هزینه‌های بالای تامین هوای فشرده، گران بوده و اغلب در آزمایشگاه و طرح‌های پایلوت استفاده می‌شوند. همچنین بدلیل مقدار زیاد هوای مسدود شده در ذرات، دانسیته کمی را در محصولات داریم. بحث مسدود شدن در نازل‌های دو - سیال زمانی است که خوراک اولیه دارای لعاب باشد و یا شامل فیبرهای طبیعی باشد. عموماً محتوا با فشاری در حدود ۲۵ PSI که منحصراً برای جابجایی مایع است به همراه گاز با فشاری در محدوده ۵۰-۱۰۰ PSI که برای اسپری کردن مورد نیاز است، پمپ می‌گردند. هوای فشرده شده اغلب به عنوان گاز اسپری

استفاده می‌شود اما گاهی اوقات بخار یا گازهای دیگر نیز استفاده می‌شود. میانگین اندازه ذرات در این سیستم بین  $150-30 \mu\text{m}$  می‌باشد که البته میزان یکنواختی ذرات در مقایسه با نازل فشاری بهتر است و این میانگین با فشار اتمیزه رابطه معکوس دارد. در بسیاری از برنامه‌های کاربردی از نازل‌های دو-سیال برای داشتن قطرات کوچک با اندازه کنترل شده در طول عملیات استفاده می‌کنند. هر نازل دارای یک منحنی عملکرد است و میزان جریان مایع و گاز، اندازه قطره ذره را تعیین می‌کند. اندازه بیش از حد قطره می‌تواند منجر به نارسایی در تجهیزات و یا داشتن اثراتی مخرب بر روی فرآیند و یا محصول باشد. ما می‌توانیم الگوی مورد نظر را از یک اسپری مانند مخروط جامد، توخالی و تخت و همچنین زاویه گسترش اسپری را با طراحی هندسه نازل در نازل‌های دو-سیال کنترل کنیم (شکل ۳-۱۵).



۳-۱۵- نازل دو-سیال.

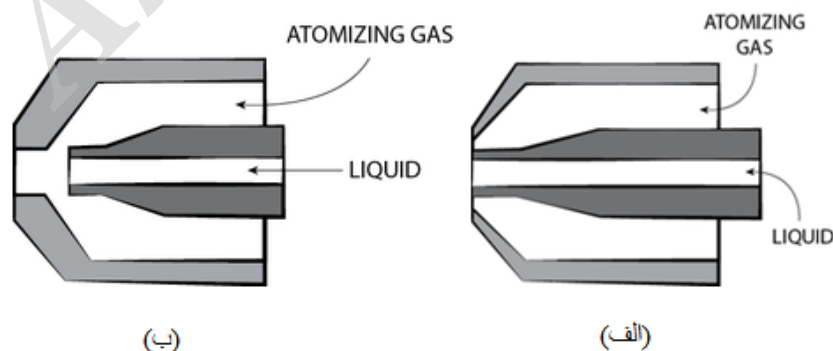
بسیاری از طرح‌های متنوع از نازل‌های دو-سیال را می‌توان در دو نوع آرایش ترکیب داخلی یا خارجی بسته به نقطه ترکیبی جریان‌های گاز و مایع طبقه بندی کرد [۷ و ۱].

### ۳ ۴ ۴ ۱ نازل دو-سیال ترکیب داخل (Internal-Mix Two-Fluid Nozzles)

در این نوع نازل سیالات در داخل با هم تماس دارند. برش بین گاز با سرعت بالا و مایع با سرعت پایین، جریان مایع را به قطراتی تبدیل می‌کند و تولید یک اسپری با سرعت بالا را داریم. این نازل برای جریان‌هایی با ویسکوزیته بالا مناسب است. این نوع نازل کاربردهای بسیاری دارد بعنوان مثال برای اتمیزه کردن سوخت.

### ۳ ۴ ۴ ۲ نازل دو-سیال ترکیب خارج (External-Mix Two-Fluid Nozzles)

در این نوع نازل سیالات در خارج از نازل با هم تماس دارند و بدلیل این ترکیب شدن در بیرون، پودر شدن به هوای بیشتری نیاز دارد. برای این نوع اتمایزر افت فشار مایع کمتر است. در این نوع اتمایزرها الگوهای اسپری مختلفی را داریم. بعنوان مثال با یک پورت هوای اضافی یک الگوی مسطح را خواهیم داشت. در شکل ۳-۱۶ شمایی از دو نوع نازل ترکیب داخلی و خارجی نشان داده شده است [۱ و ۷].



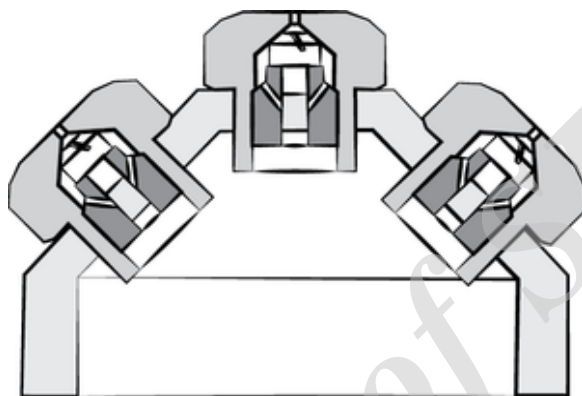
شکل ۳-۱۶- (الف) نازل ترکیب خارجی و (ب) نازل ترکیب داخلی.

### ۳ ۴ ۳ - نازل ترکیبی (Compound Nozzle)

نازلی که خروجی‌های متعددی دارد به عنوان یک نازل ترکیبی یا مرکب شناخته شده است. در

این نوع نازل چندین نازل تک یا دو-سیال در بدنه یک نازل وجود دارد (شکل ۳-۱۷). در این

نوع نازل کنترل اندازه قطره و زاویه پوشش اسپری قابل طراحی است [۳۳].



شکل ۳-۱۷- نازل مرکب فشار-چرخش (الگوی گسترده).

### ۳ ۴ ۳ - فاکتورهای کارایی نازل

#### ۳-۳-۱- خواص مایع

تقریباً همه داده‌های اندازه قطرات بر اساس اسپری کردن آب در شرایط آزمایشگاهی ( $21^{\circ}\text{C}$ )

حاصل شده است بنابراین باید اثر خصوصیات مایع برای هر ماده فهمیده شود بویژه موادی که

خواص آنها با تغییرات اندازه قطره می‌تواند تغییر کند.

### ۳ ۴ ۴ - دما

تغییرات دمای مایع بطور مستقیم بر کارایی نازل تاثیر گذار نمی‌باشد اما می‌تواند بر خصوصیاتی از مایع مانند ویسکوزیته و کشش سطحی و چگالی مایع تاثیر گذار باشد که نتیجه آن تغییر در عملکرد نازل می‌باشد.

### ۳ ۴ ۴ - وزن مخصوص (Specific Gravity)

وزن مخصوص یا چگالی نسبی، نسبتی است از جرمی از یک حجم مایع داده شده به جرمی از همان حجم آب. در فرآیند اسپری کردن، اثر اصلی چگالی نسبی یا وزن مخصوص مایعات غیر از آب بر روی ظرفیت اسپری نازل است.

### ۳ ۴ ۴ - جنس نازل

نازل‌ها اکثراً از فولاد ضد زنگ ساخته می‌شوند باین حال، نازل کاربرد تنگستن با مقاومت به سایش خوب و مقاومت در برابر خوردگی بسیار عالی برای بسیاری از مواد مناسب می‌باشد. همچنین نازل‌های اسپری اغلب از فلزاتی مانند برنج (مخلوط روی و مس) و آلیاژهای نیکل نیز ساخته می‌شوند و علاوه بر این از پلاستیک‌هایی مانند PVC و سرامیک‌ها (آلومینا و کاربرد سیلیکون) نیز استفاده می‌شود. در مورد جنس نازل بطور کلی باید پارامترهایی مانند واکنش‌های شیمیایی (خوردگی و فرسایش) و اثر درجه حرارت بالا باید مورد توجه قرار گیرد.

### ۳ ۴ ۵ - ویسکوزیته

ویسکوزیته دینامیکی یک مایع بر اساس مقاومت و پایداری‌اش در برابر تغییر شکل و یا نظم و چیدمان عناصرش در طول جریان می‌باشد. ویسکوزیته مایع اصولاً بر الگوی اسپری و اندازه ذرات تاثیر گذار است. ویسکوزیته بالا، مانع از شکل گیری صحیح قطره می‌گردد. همچنین با کاهش ویسکوزیته، انرژی و فشار کمتری برای شکل گیری قطرات مورد نیاز است.

### ۳ ۴ ۶ - کشش سطحی

اثرات اصلی کشش سطحی بر حداقل فشار عملیاتی، زاویه اسپری، و اندازه قطره می‌باشد. کشش سطحی بالا زاویه اسپری را کاهش می‌دهد و کشش سطحی پایین اجازه عملکرد نازل در فشارهای پایین تر را می‌دهد. افزودن مقدار کمی سورفاکتانت می‌تواند به میزان قابل توجهی کشش سطحی را پایین تر بیاورد که در یک الگوی اسپری گسترده‌تر، منجر به اندازه قطرات کوچکتر، و سرعت بالاتر قطره خواهد شد [۳۴].

### ۳ ۴ - عوامل منفی بر کارایی نازل

انتخاب ماده مناسب برای یک نازل یکی از مهمترین پارامترهایی است که در طول عمر نازل و عملکرد آن موثر است.



عواملی که در کوتاه شدن عمر عملکرد یک نازل موثر هستند شامل موارد زیر است [۳۴]:

۱- اثر پوششی ذرات جامد معلق شده در مایع اسپری شده

۲- اثر خوردگی شیمیایی ناشی از مایع اسپری شده

۳- اثر خوردگی شیمیایی ناشی از محیط بیرونی نازل

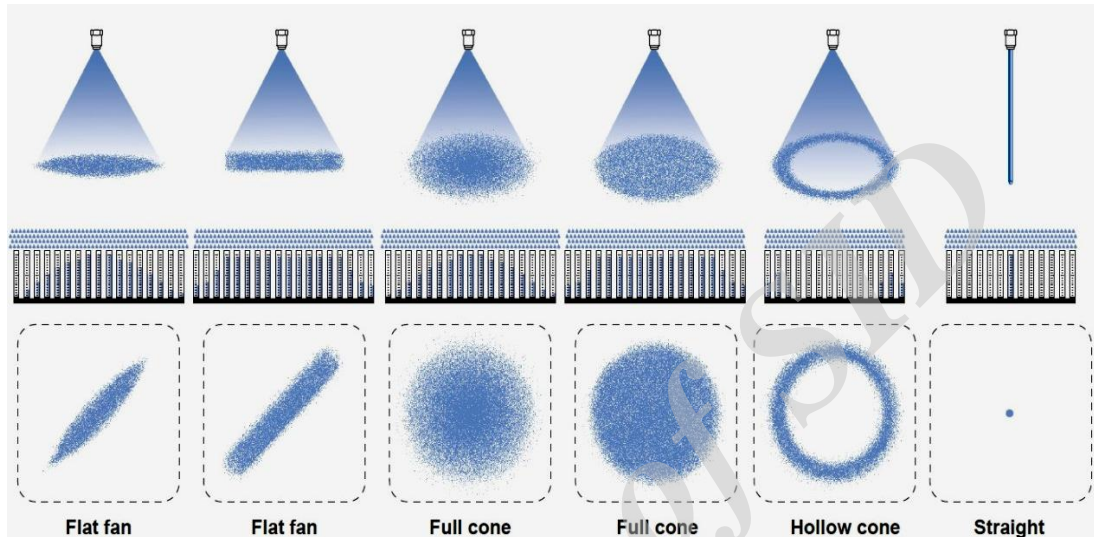
۴- اثر دمای بالا

۵- اثر تنش‌ها و یا ضربات مکانیکی

Archive of SID

## بخش ۴- انواع الگوهای اسپری

الگوی اسپری می‌تواند در فرم یا قالب مشخصی که مورد نیاز است از طریق پارامترهایی مانند سرعت اسپری و نوع طراحی نازل کنترل شود (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱- انواع الگوهای اسپری.

تقارن الگوی اسپری تولید شده توسط یک اتمایزر یک عامل مهم در بسیاری از کاربردهای عملی است. بعنوان مثال در محفظه احتراق توربین گاز، برای رسیدن به راندمان بالای احتراق، توزیع انتشار آلاینده پایین و افزایش طول عمر پره توربین توزیع سوخت باید یکنواخت شود.

رفتار قطرات بواسطه بزرگی نسبی دو نیروی متضاد کنترل می‌شود که عبارتند از: انرژی جنبشی اولیه جت مایع و مقاومت آیرودینامیکی گاز یا هوای اطراف. همچنین مسیری که مایع بعد از خروج از نازل طی می‌کند تحت تاثیر نیروی گرانش و نیروی ناشی از هوای اطراف می‌باشد. به طور کلی، یک اسپری فشرده و باریک نفوذ بالایی دارد در حالی که یک اسپری که به خوبی اتمیزه شده است دارای

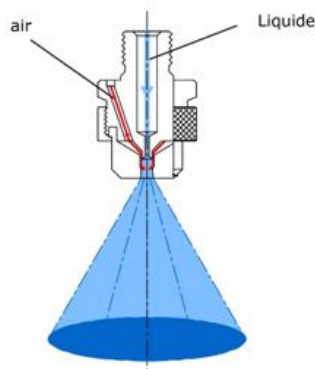
یک زاویه مخروط گسترده و تمایل به نفوذ پایینی دارد. در ادامه به برخی از الگوهای اسپری اشاره شده است [۶ و ۲۰].

#### ۴-۱- الگوی مخروطی کامل (Full Cone Pattern)

در این الگو، اسپری قطرات در داخل یک حجمی که با یک مخروط محدود شده است توزیع شده‌اند که نقطه منشاء آن نیز در دهانه یا orifice نازل می‌باشد و چنین الگویی در صنایع مختلفی استفاده می‌شود. از این الگوی اسپری می‌توان در توزیع قطرات مایع در یک حجم مشخص و خاصی نیز استفاده کرد. بدلیل گستردگی استفاده از این نوع الگو اسپری در فرآیندهای مختلف شکل اصلی آن در رنج گسترده‌ای از انواع تخصصی توسعه یافته است.

#### ۴-۱-۱- الگوی مخروط کامل استاندارد (Standard Full Cone)

در نازل‌های اغتشاشی در دهانه ورودی نازل پرده یا تیغه‌ای تعبیه شده است که منجر به ایجاد حرکت چرخشی در مایع در حال عبور از نازل می‌شود (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲- شمایی از یک الگوی مخروط کامل استاندارد.

گسترده‌گی زاویه مخروط تابعی از سرعت خروجی (ایجاد شده از فشار دهانه ورودی) و طراحی داخلی می‌باشد که می‌تواند عملاً در مقادیری بین  $15^{\circ}$  تا  $120^{\circ}$  متغیر باشد. این نازل‌ها همچنین می‌توانند مخروط کامل مربعی را بر اساس طراحی ویژه روزنه یا دهانه خروجی ایجاد کنند.

#### ۴-۱-۲- الگوی مخروط کامل مارپیچی (حلزونی)

این طرح بطور مناسبی یک مخروط کامل نیست بلکه یک پرده مایع پیوسته در حال توسعه با یک شکل حلزونی یا مارپیچی داخل یک حجم مخروطی است. نازل‌هایی با این طرح برای سیستم‌های اطفاء حریق مناسب هستند (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳- شمایی از یک الگوی مخروط کامل مارپیچی.

#### ۴-۱-۳- الگوی چند مخروط کامل (Multiple Full Cone)

این الگوی اسپری در دو مورد استفاده می‌شود (شکل ۴-۴):

۱- وقتی که یک زاویه اسپری گسترده و یا قطراتی با اندازه کوچک در ظرفیت بالا نیاز است.

بنابراین چندین نازل با جهت‌های اسپری متفاوت در یک خوشه کنار هم قرار می‌گیرند.

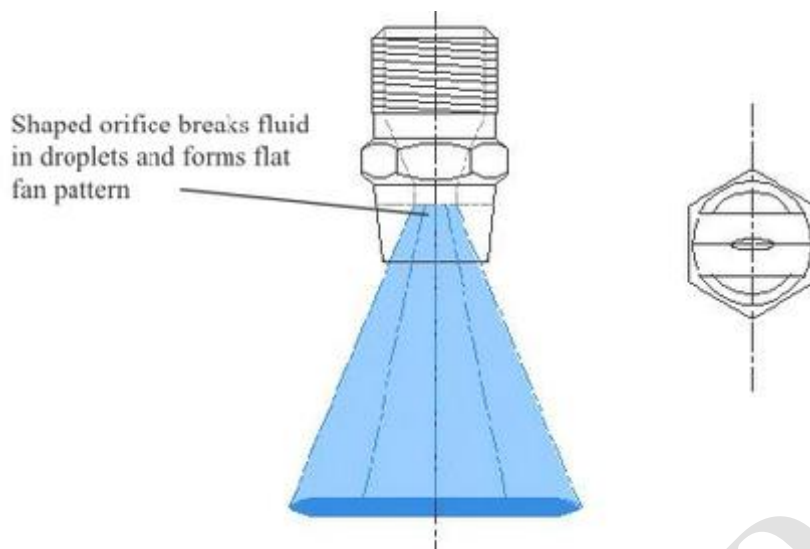
۲- وقتی که یک زاویه گسترده از نازلی که به تنهایی زاویه محدودی را ایجاد می‌کند نیاز است. البته در مورد اتمایزر هوایی در زاویه گسترده عموماً همگنی و یکنواختی الگوی اسپری‌ها و توزیع قطرات از بین می‌رود. بنابراین در این مورد از اسپری‌های زاویه کوچک در جهات مختلف استفاده می‌شود.



شکل ۴-۴- چند مخروط کامل (cluster nozzle).

#### ۴-۱-۴- الگوی اسپری مسطح (Flat Fan Spray Pattern)

در این الگو قطرات مایع به شکل یک لایه مایع صاف یا مسطح می‌باشند و مطابق با اصول استفاده شده به منظور تولید اسپری، ضخامت‌های مختلفی را از این لایه مایع در این الگو خواهیم داشت. این نوع الگوی اسپری به منظور اسپری کردن بر روی یک سطح یا شی در حال حرکت (در جهت عرضی نسبت به سطح نازل) استفاده می‌شود و از متداولترین مثال‌ها در این زمینه در نازل‌های بکار برده شده در کارواش‌های شستشوی ماشین می‌باشد (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵- الگوی اسپری مسطح.

#### ۴ ۴- الگوی اسپری مخروطی میان تهی (Hollow Cone Spray Pattern)

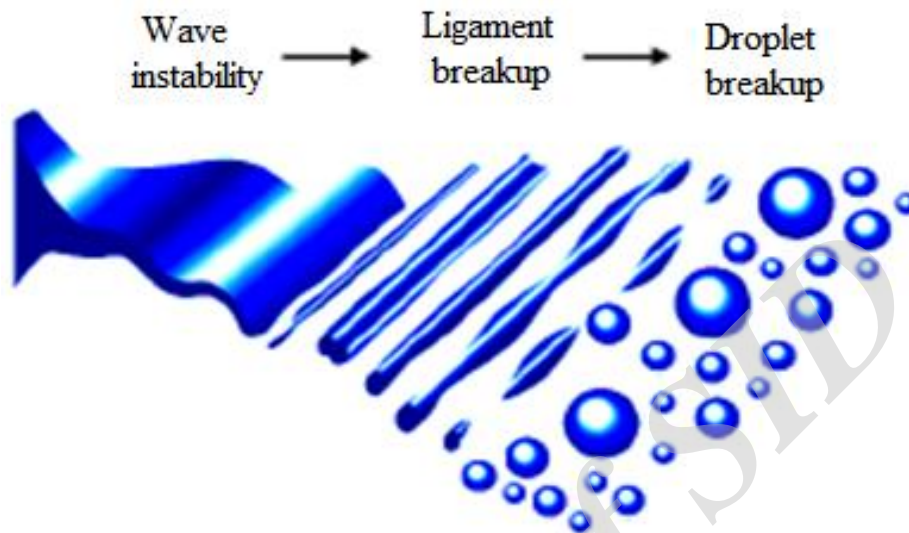
در این الگوی اسپری قطرات در سطح بیرونی یک حجم مخروطی شکل متمرکز شده‌اند و در داخل این حجم مخروطی هیچ قطره‌ای نداریم. این نوع الگو عمدتاً در سیستم‌های خنک کننده گاز در فرآیندهای صنعتی مختلفی استفاده می‌شوند (شکل ۴-۶).



شکل ۴-۶- الگوی اسپری مخروطی میان تهی.

## بخش ۵- مکانیسم تولید اسپری (Spray Generation)

در شکل ۵-۱ شمایی از تولید قطره در ضمن خروج مایع از نازل نشان داده شده است [۶، ۲۴ و ۳۵].



شکل ۵-۱- تصویری شماتیک از فرآیند تشکیل قطره ضمن فرآیند اسپری کردن.

در این مدل نظری که درستی آن بر اساس یافته‌های علمی تایید شده است، مایع از طریق نازل جریان پیدا می‌کند و بعد از عبور از روزنه یا دهانه نازل بصورت یک لایه نازک بیرون می‌آید. این لایه بدلیل بی‌ثباتی القا شده ناشی از نیروهای آیرودینامیکی ابتدا بصورت قطعات باریکی در آمده (رشد موج). وقتی دامنه موج به یک مقدار بحرانی رسید پاره شدن موج را داریم که در انتها به قطراتی شکسته می‌شوند. از آنجا که اصولاً فروپاشی امواج بسیار نامنظم است بنابراین قطراتی با اندازه‌های متفاوت خواهیم داشت.

**نکته مهم:** همانطور که در قسمت‌های قبل نیز بدان اشاره شد بطور کلی در جایی که بدست آوردن

قطراتی کوچک مد نظر هستند به منظور داشتن کوچکترین قطرات می‌توان از اتمایزهای هوایی

air-assisted و یا air-blast استفاده کرد.

بنابر فرآیند ذکر شده در بالا می توان نتیجه گرفت که میانگین اندازه قطرات به چندین فاکتور وابسته

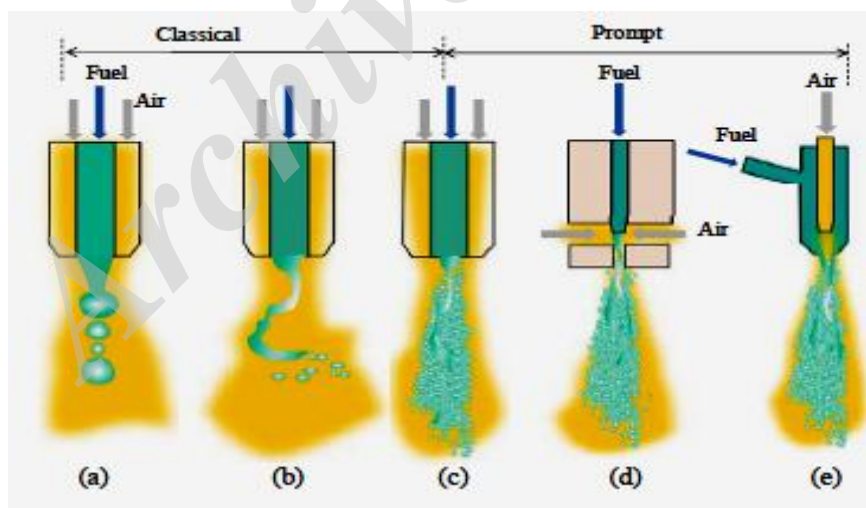
است:

۱- ضخامت لایه مایع

۲- همواری یا بعبارتی یکنواختی لایه مایع

۳- یک جریان دائمی و فرآیند شکستن.

علاوه بر فروپاشی مایع از طریق مکانیسم بی ثباتی موج (شکل ۵-۲-۵ a و b) که بدان اشاره شد در مکانیسم دیگر متمیزه شدن، تولید قطره بدون تشکیل این موج رخ می دهد (فروپاشی آیرودینامیکی یا (prompt atomization) (شکل ۵-۲-۵ c, d, e)).



شکل ۵-۲- تصویر شماتیک از فرآیندهای فروپاشی مایع و تشکیل قطره بر اساس دو نوع مکانیسم.

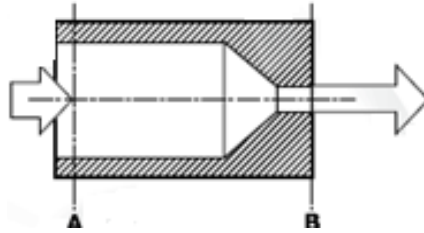


زمانی که هوا یا گاز و مایع در یک مسیر باشند، مقیاس زمانی روند فروپاشی نسبتاً طولانی باشد و یا زمانی که سرعت اسپری هوا کم است، فروپاشی مایع بر اساس مکانیسم بی ثباتی موج می‌باشد. در مقابل، هنگامی که مقیاس زمانی به منظور توسعه بی ثباتی موج بسیار کوتاه است، تمیزه شدن بسرعت رخ می‌دهد (prompt atomization). چنین وضعیتی زمانی است که هوا با جریان مایع برخورد میکند و سرعت نسبی هوا به مایع به اندازه کافی بزرگ است. در نازل‌های air-assisted نیز زمانی که فشار هوا زیاد می‌شود (حدود ۷۹۰ kPa) این نوع مکانیسم شکستن سریع مایع و تشکیل قطرات را داریم [۲۴].

به منظور محاسبه میزان و یا سرعت جریان تخلیه از یک نازل قانون برنولی (Bernoulli law) استفاده می‌شود. براساس این قانون انرژی یک جریان مایع در ضمن جریان بدون تغییر باقی می‌ماند (معادله ۱) [۶].

$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g z = E$$

در این قانون P فشار ذرات مایع در واحد حجم،  $\frac{1}{2} \rho v^2$  انرژی جنبشی ذرات مایع در واحد حجم،  $\rho g z$  انرژی پتانسیل ذرات مایع در واحد حجم است و g شتاب گرانشی،  $\rho$  دانسیته مایع، z ارتفاع نسبت به یک سطح و V ویسکوزیته مایع می‌باشد. بنابراین اگر ما دو بخش از یک لوله را در نظر بگیریم، بخش A و بخش B، انرژی ثابت می‌ماند و می‌توان معادله ۱ را به صورت معادله ۲ نوشت.



$$2 \quad P_A + \frac{1}{2} \rho V_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2} \rho V_B^2 + \rho g z_B$$

اگر این دو بخش را قسمت‌های قبل و بعد از دهانه خروجی نازل در نظر بگیریم آنگاه داریم:

$$\begin{cases} Z_A = Z_B \\ P_B = 0 \\ V_A = 0 \end{cases}$$

( $P_A$  is a differential pressure referred at the atmosphere pressure)

negligible as compared to  $V_B$  (for orifice diameter much smaller than the duct diameter)

بنابراین فرمول را بصورت زیر خواهیم داشت (معادله ۳) و براساس آن سرعت خروجی به فشار وابسته

است:

$$P_A = \frac{1}{2} \rho V_B^2 \Rightarrow V_B = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot P_A} \Rightarrow 3 \quad V = C \cdot \sqrt{P}$$

علاوه بر این با تعریف یک ثابت جدید  $K$  که شامل مساحت دهانه خروجی نازل است (A) معادله ۴

را داریم که براساس آن برای یک نازل در حال اسپری کردن در یک اتاق در فشار محیط، جریان

خروجی متناسب است با فشار خط خوراک و بنابراین ظرفیت نازل نیز به فشار وابسته است:

$$Q = A \cdot V \Rightarrow Q = A \times C \times \sqrt{P} \Rightarrow 4 \quad Q = K \cdot \sqrt{P}$$

با در نظر گرفتن دو مقدار فشار متفاوت برای یک نازل و با توجه به اینکه  $K$  یک مقدار ثابتی است

بنابراین خواهیم داشت:

$$K = \frac{Q}{\sqrt{P}} \Rightarrow K = \frac{Q_1}{\sqrt{P_1}} = \frac{Q_2}{\sqrt{P_2}} \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}$$

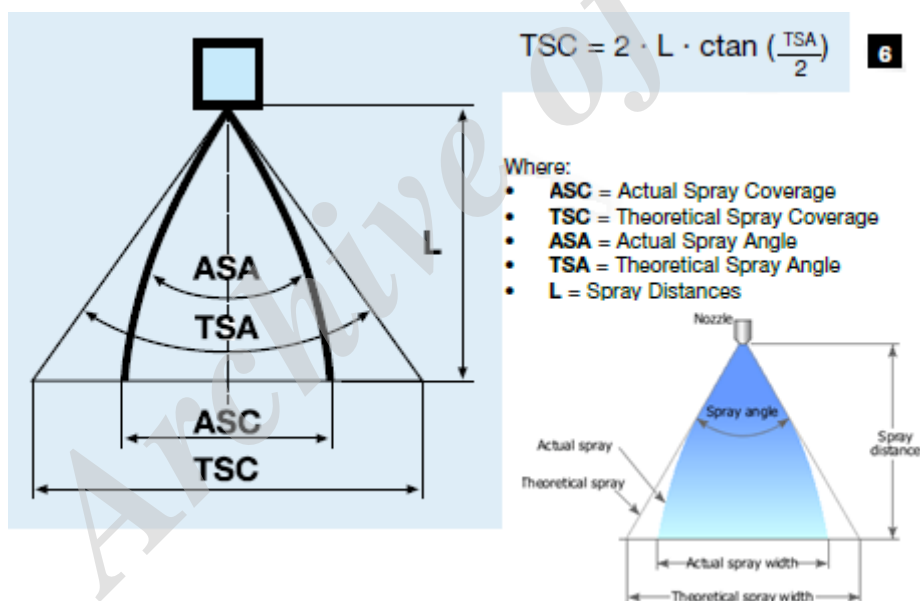
بر اساس این نتایج معادله ۵ را داریم که بر اساس آن می‌توان مقدار جریان خروجی نازل را در هر

مقدار فشار داده شده‌ای محاسبه کرد و ظرفیت نازل را در یک فشار متفاوت داشت:

$$5 \quad Q_2 = Q_1 \cdot \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}$$

## بخش ۶- زاویه اسپری (Spray Angle)

زاویه اسپری یک زاویه باز است که قطرات به هنگام خروج از دهانه نازل ایجاد می‌کنند و یکی از پارامترهای بنیادی در انتخاب نازل می‌باشد. در حقیقت دامنه زاویه اسپری که فاصله بین دهانه خروجی نازل و هدف مورد نظر است، پوشش اسپری و دانسیته مایع اسپری شده را نسبت به سطح پوشش تعیین می‌کند. بر اساس رابطه ۶ در شکل ۶-۱ می‌توان پهنای تئوری اسپری را محاسبه کرد. در این رابطه زاویه واقعی و تئوری اسپری، فاصله اسپری و پهنای واقعی اسپری قابل اندازه‌گیری هستند [۶، ۳۶ و ۳۷].



شکل ۶-۱- محاسبه پهنای تئوری اسپری و زاویه اسپری.

بر اساس رابطه ۶ در جدول ۶-۱ پهنای تئوری اسپری بر اساس زوایای اسپری مختلف و فاصله از خروجی نازل محاسبه شده است. در اینجا ذکر این نکته نیز لازم است که بدلیل فاکتورهایی مانند نیروی گرانشی و کشش ایرودینامیکی مقدار زاویه اسپری نمی‌تواند ثابت نگه داشته شود. همچنین

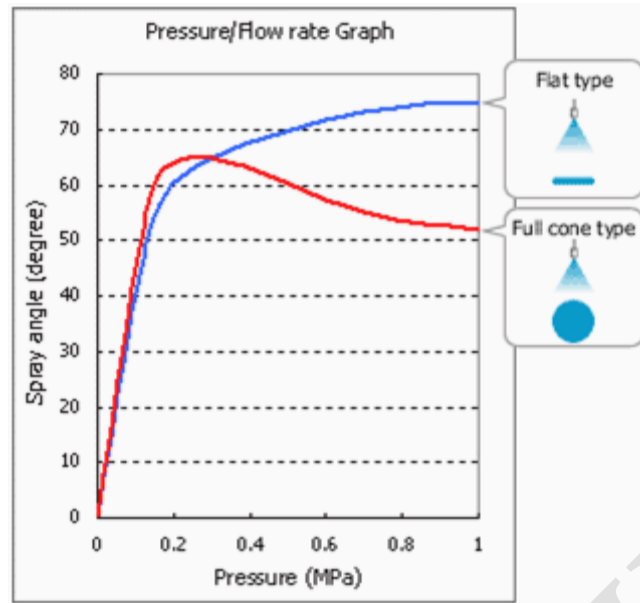
برای اتمایزهای هوایی استفاده از اصطلاح زاویه اسپری نادرست است زیرا هیچ مقدار دقیقی قابل اندازه گیری نیست. طرح‌های مختلف از نازل و تغییرات فشار در خوراک اولیه نیز بر این زاویه اسپری تاثیر می‌گذارد.

جدول ۶-۱- پهنای تئوری اسپری در فواصل مختلف از دهانه خروجی نازل.

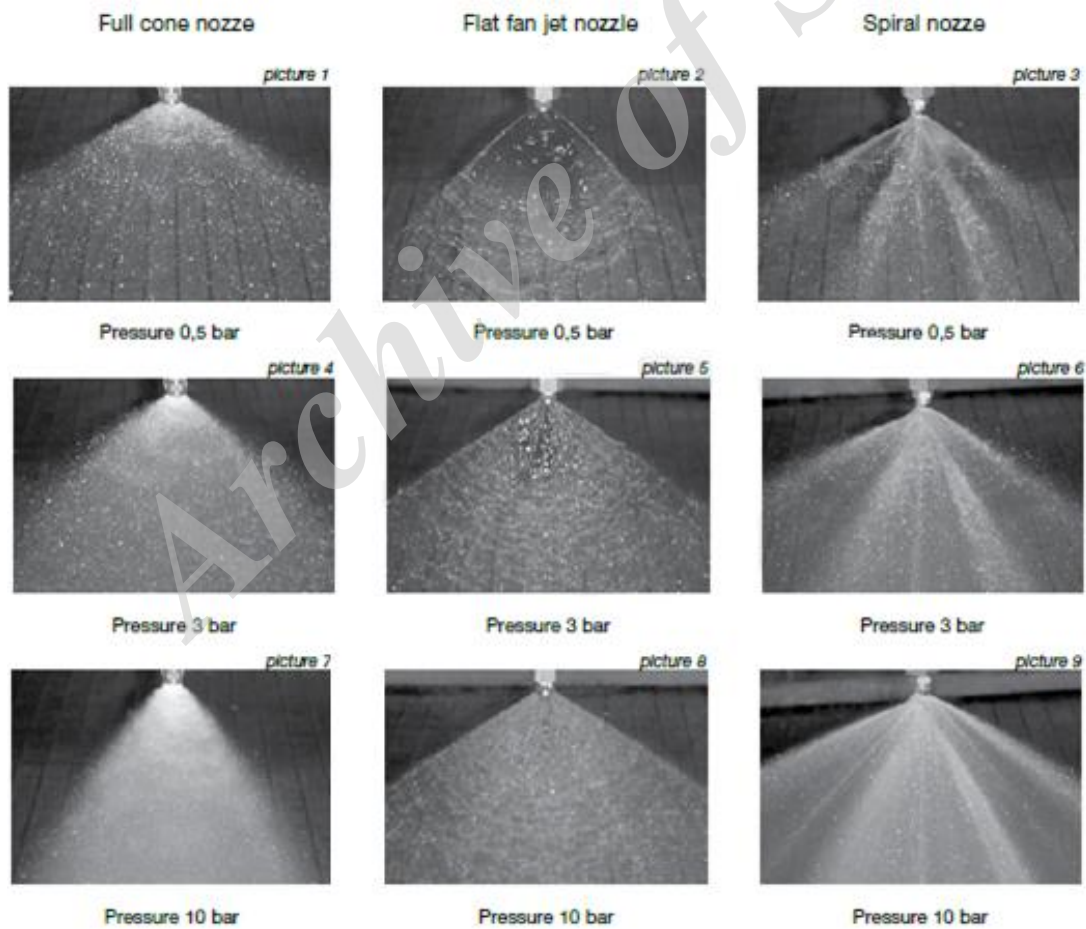
THEORETICAL SPRAY COVERAGE at various distances from nozzle orifice												
Spray Angle	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm	400 mm	500 mm	600 mm	700 mm	800 mm	1000 mm
15°	13	26	40	53	66	79	105	132	158	184	211	263
25°	22	44	67	89	111	133	177	222	266	310	355	443
30°	27	54	80	107	134	161	214	268	322	375	429	536
35°	32	63	95	126	158	189	252	315	378	441	505	631
40°	36	73	109	146	182	218	291	364	437	510	582	728
45°	41	83	124	166	207	249	331	414	497	580	663	828
50°	47	93	140	187	233	280	373	466	560	653	746	933
60°	58	116	173	231	289	346	462	577	693	808	924	1150
65°	64	127	191	255	319	382	510	637	765	892	1020	1270
70°	70	140	210	280	350	420	560	700	840	980	1120	1400
75°	77	154	230	307	384	460	614	767	921	1070	1230	1530
80°	84	168	252	336	420	504	671	839	1010	1180	1340	1680
90°	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	1400	1600	2000
95°	109	218	327	437	546	655	873	1090	1310	1530	1750	2180
100°	119	238	358	477	596	715	953	1190	1430	1670	1910	2380
110°	143	286	429	571	714	857	1140	1430	1710	2000	2290	2856
120°	173	346	520	693	866	1040	1390	1730	2080	2430	2771	3464
130°	215	429	643	858	1070	1290	1720	2150	2570	3002	3431	4289

بطور کلی با افزایش فشار، نازل مخروط کامل (full cone nozzle) زوایای باریکتری را تولید خواهد کرد، نازل‌های مسطح (flat fan nozzle) یک زاویه اسپری پهن‌تری را نشان خواهند داد و در این میان نازل‌های مارپیچی (spiral nozzle) کمتر تحت تاثیر تغییرات فشار قرار می‌گیرند (شکل ۶-۲). همچنین همه نازل‌ها در مقادیر فشار خیلی پایین نیز بدرستی عمل نمی‌کنند و در نتیجه قطراتی بزرگتر با الگوی اسپری نامناسب و تعریف نشده و زوایای اسپری کمتر را خواهیم داشت. در شکل ۶-

۳ الگوی زوایای اسپری برای نازل‌های مختلف در مقادیر فشار متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۶-۲- نمودار تغییرات زاویه اسپری بر حسب فشار برای دو نوع نازل مخروط کامل و مسطح.



شکل ۶-۳- الگوی زوایای اسپری مختلف در فشارهای متفاوت.

## بخش ۷- ویسکوزیته مایع

یکی از خصوصیات مایعات متحمل شدن تغییر شکل مداوم آنها وقتی در معرض فشار برشی قرار می‌گیرند می‌باشد. مقاومت مایعات در برابر جریان بدلیل وجود اصطکاک درونی با عنوان ویسکوزیته مطرح شده است. ویسکوزیته با سیستم‌های مختلفی اندازه‌گیری می‌شود که برخی از آنها که از متداولترین آنها می‌باشند در جدول ۷-۱ ارائه شده است.

جدول ۷-۱- واحدهای اندازه‌گیری ویسکوزیته.

	METHOD	UNIT	DIMENSIONS	NOTES
1	Dynamic viscosity (Absolute viscosity)	Poise	$ML^{-1} \cdot T^{-1}$	Poise = 100 Centipoises = (1 dyne per sec/cm <sup>2</sup> )
2	Kinematic viscosity	Stoke	$L^2 \cdot T^{-1}$	1 Stoke = 100 Centistoke = (cm <sup>2</sup> /sec) Kinematic viscosity = Dynamic viscosity/density
3	SSU/SSF			One of the most widely instruments to determine is the Saybolt viscosimeter, which measures the time in seconds required for a fixed volume of a given liquid to flow through an orifice. SSU = Seconds Saybolt Universal relates to a smaller orifice for less viscous liquids. SSF = Seconds Saybolt Furol relates to a larger orifice for more viscous liquids.

اصولاً مقدار ویسکوزیته یک مایع به دما وابسته است بنابراین مقدار ویسکوزیته بایستی با ارجاع به یک مقدار دما داده شود [۶].

### ۷-۱- اثر ویسکوزیته بر روی میزان جریان نازل

یک مایعی که دارای ویسکوزیته‌ای بالاتر از آب است انرژی بیشتری برای پمپ شدن و اسپری شدن می‌خواهد و بنابراین در فشار یکسان با سرعت و شتاب کمتری نسبت به آب جریان خواهد یافت و در نتیجه کاهشی را در اغتشاش و آشفتگی جریان خواهیم داشت. بنابراین در نازل‌هایی

مانند نازل مخروط توخالی چرخشی (شکل ۷-۱) (whirl hollow cone nozzle) در حالی که

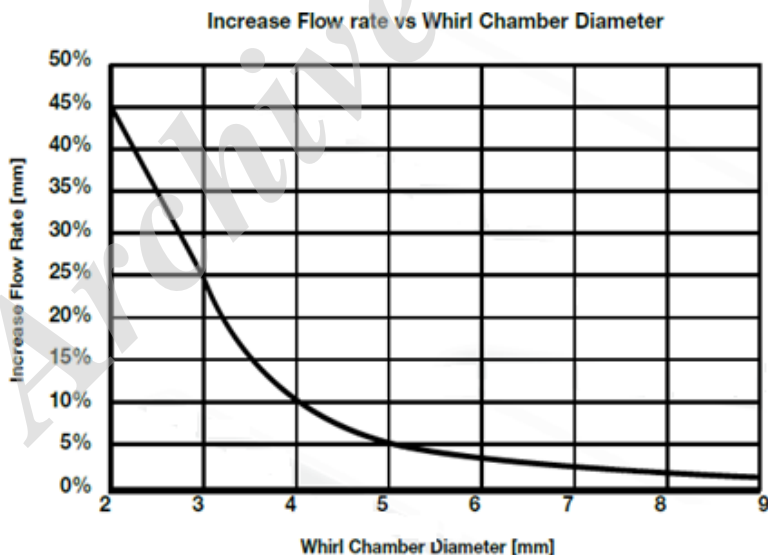
مایعاتی با ویسکوزیته بالاتر از آب اسپری می‌شوند یک افزایشی را در ظرفیت نشان می‌دهند.



شکل ۷-۱- شمایی از یک نازل مخروط توخالی چرخشی (whirl hollow cone nozzle).

این افزایش برای نازل‌هایی با اندازه کوچک سازگار و پایدار است که در آنها شعاع کوچک محفظه

چرخش باعث بالا رفتن اغتشاش در جریان می‌شود.



شکل ۷-۲- نموداری از تغییرات مقدار سرعت جریان بر حسب قطر محفظه چرخش.

شکل ۷-۲ نموداری را نشان می‌دهد که مربوط به مایعی با ویسکوزیته‌ای در حدود ۴ سانتی

استوک و نازل مخروط توخالی چرخشی (whirl hollow cone nozzle) است که در آن نوسانات



و یا تغییرات معمول در مقدار سرعت جریان نازل برای مقادیر مختلفی از قطر محفظه چرخش بررسی شده است. البته در بسیاری از موارد کاربردی (جایی که نازل‌هایی با قطر محفظه چرخشی بیش از ۳ میلی متر استفاده می‌شود) از این تغییرات چشم پوشی می‌شود.

برای دیگر انواع نازل‌ها یعنی آنهایی که براساس اصل اغتشاش کار نمی‌کنند، افزایش ویسکوزیته سرعت خروج مایع در دهانه نازل را کاهش می‌دهد بنابراین باعث یک کاهش در ظرفیت می‌شود.

#### ۴۷ اثر ویسکوزیته بر زاویه و الگوی اسپری

بر اساس نتایج و تجربیات موجود می‌توان براحتی تصور کرد که اسپری کردن یک مایع ویسکوز-تر از آب به مراتب مشکل‌تر است و تمامی شرایط و خصوصیات اسپری تغییر می‌کند:

۱- یک مقدار بالاتر برای حداقل فشار عملیاتی

۲- توزیع اسپری نامناسب

۳- زاویه اسپری باریک

بطور کلی بدلیل تاثیر عوامل مختلف نتایج برای نازل‌های مختلف در فشارهای مختلف و با مایعات مختلف به دشواری قابل پیش بینی هستند ولی نتایج تجربی نشان می‌دهد که در بیشتر

موارد نازل‌های ضربه ای (impact nozzle) نتایج قابل استنادی را در مقایسه با سایر نازل‌ها نشان می‌دهند.

بر اساس قانون برنولی (Bernoulli Rule)، انرژی فشار جریان مایع در ورودی نازل به سرعت مایع تبدیل می‌شود. اگر دانسیته یا گرانی مایعی متفاوت از آب است، انرژی فشار قابل دسترس، یک سرعت مایع متفاوتی را در دهانه خروجی نازل تولید خواهد کرد. بنابراین یک مایع سنگین تر از آب با سرعت کمتری و سرعت جریان کمتری از نازل خارج خواهد شد و در عین حال یک مایع سبکتر از آب نیز با سرعت جریان بالاتری اسپری خواهد شد. در معادله ۷، بر اساس میزان جریان آب می‌توان میزان جریان برخی مایعات دیگر را تخمین زد.

7

$$Q_L = F \cdot Q_W$$

Where:

$Q_L$  Liquid flow rate

$Q_W$  Water flow rate

F Correction factor

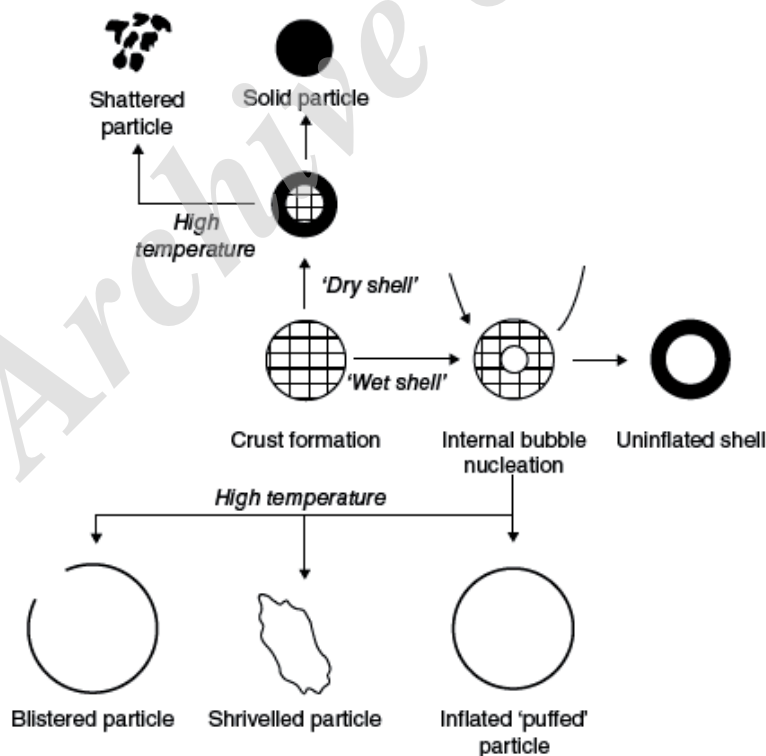
در این فرمول F فاکتور تصحیحی می‌باشد که در جدول ۷-۲ مقادیری برای آن برای مایعاتی با وزن مخصوص متفاوت از آب داده شده است.

جدول ۷-۲-مقادیر فاکتور تصحیحی F

kg/liter	Libre/gallon	F
0,6	5,0	1,29
0,7	5,8	1,20
0,8	6,7	1,12
0,9	7,5	1,05
1,0	8,3	1,00
1,1	9,2	0,95
1,2	10,0	0,91
1,3	10,9	0,88
1,4	11,7	0,85
1,5	12,5	0,82
1,6	13,4	0,79
1,7	14,2	0,77
1,8	15,0	0,75
1,9	15,9	0,73
2,0	16,7	0,71

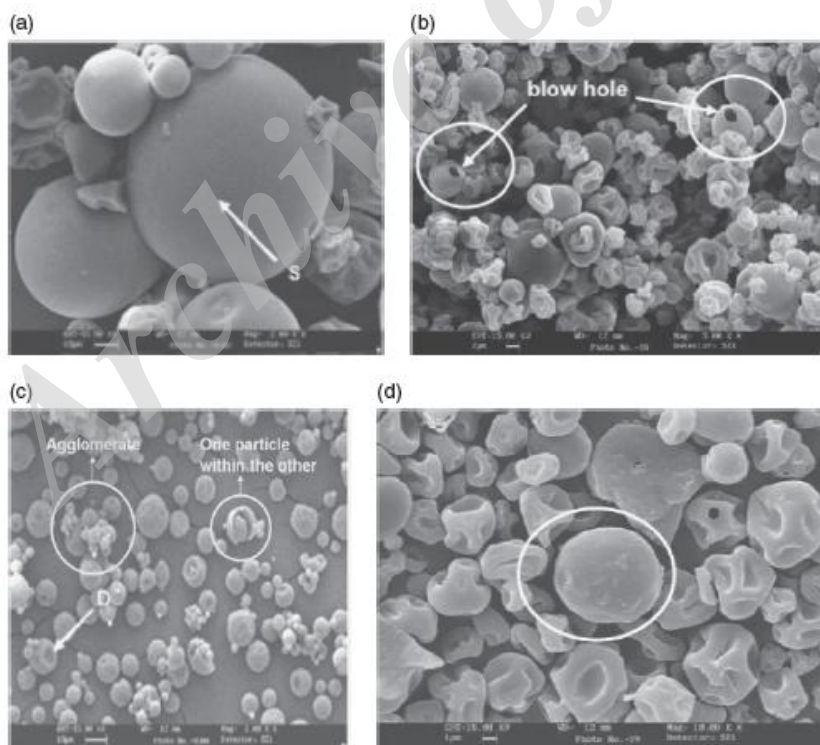
## بخش ۸ - مورفولوژی ذرات (Morphology Of Particle)

مورفولوژی ذرات یک شاخصه و جنبه ظریفی است که پارامترهای فرآیند را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مورفولوژی بر ویژگی‌های کلیدی محصولات اسپری مانند توزیع اندازه ذرات، سیالیت، شکنندگی، رطوبت و وزن مخصوص ظاهری تاثیر می‌گذارد. از این رو، درک متغیرهایی که بر مورفولوژی موثر هستند ضروری است. تعامل بین متغیرهایی از قبیل دمای ورودی و خروجی، میزان و سرعت جریان، خواص خوراک و غلظت آن و گرمای نهان حلال مورفولوژی نهایی ذرات را کنترل می‌کنند. در شکل ۱-۸ الگوی مورفولوژی‌های مختلف محصولات در ضمن فرآیند خشک کردن پاششی یا اسپری درایینگ نشان داده شده است [۳۸ و ۳۹].



شکل ۸-۱- مورفولوژی‌های مختلف در فرآیند خشک کردن پاششی یا اسپری درایینگ.

اولین مرحله شامل تشکیل پوسته می‌باشد و بدنبال آن دو مسیر را برای تشکیل ذرات در نظر گرفته‌اند که یک مسیر منجر به تشکیل ذراتی توپر و کوچک شده (پوسته خشک Dry shell) و مسیر دیگر منجر به تشکیل ذرات بزرگ و توخالی (پوسته مرطوب Wet shell) می‌شود. در دماهای بالا ذرات توپر و کوچک مستعد خرد شدن و شکستن هستند و ذرات بزرگ و توخالی نیز مستعد ترکیدن هستند. بطور کلی در فرآیند اسپری درآینگ دمای خشک کردن و محتوای محلول یا سوسپانسیون اولیه تاثیر بسزایی در مورفولوژی محصول دارد. افزایش غلظت خوراک اولیه نیز مانع از ترکیدن و خرد شدن ذرات حاصل از اسپری می‌شود. در شکل ۸-۲ نیز تصویر مورفولوژی ذرات بدست آمده در اسپری درآینگ با میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده است [۳۹].



شکل ۸-۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی ذرات بدست آمده از اسپری درآینگ (a) سطح صاف (b) تشکیل حفره تنفسی (c) توده ای شدن (d) سطح تورفته یا گود رفته.

به لحاظ ساختاری توده‌ای شدن (agglomeration) ناشی از بهم چسبیدن ذرات منفرد می‌باشد که در محصولات حاصل از اسپری نیز این نوع مورفولوژی مکرراً رویت می‌شود (شکل C-40). این توده‌ای شدن می‌تواند در نتیجه اتصال تنها دو ذره باشد و یا در نتیجه اتصال بیش از دو ذره باشد. این اتصال به نیروی برخورد ذرات و مدت زمان تماس بستگی دارد که سرعت نسبی ذرات و جرم آنها بر این دو پارامتر موثر هستند. ویژگی‌های سطح ذره که شامل محتوا یا ترکیب، دما و ویسکوزیته ذره می‌باشد و همچنین وجود مواد جامد نامحلول و یا کم محلول در سوسپانسیون یا خوراک اولیه تاثیر بسزایی در تشکیل توده دارند. در برخی موارد وجود این توده‌ای شدن در محصولات حاصل از اسپری می‌تواند مفید نیز باشند چرا که محصولاتی با این ویژگی اغلب قابلیت انحلال و پراکنده شدن بهتری را در بیشتر حلال‌ها از جمله آب نشان می‌دهند بنابراین در تهیه محصولاتی مانند قهوه‌های فوری (instant coffee) بسیار مناسب نیز هستند.

یکی از شکل‌های عمده در مورفولوژی ذرات حاصل از اسپری تشکیل ذرات غیر کروی و دگر شکلی ذرات است که عمدتاً ناشی از اتمیزه شدن ناقص است (Incomplete atomization). وجود ذرات غیر کروی بویژه در ناحیه پایینی جریان ذرات خارج شده از نازل عمدتاً به دو دلیل است:

۱- فروپاشی مایع و تشکیل قطرات ناشی از فعل و انفعالات بین مایع و گاز، به عنوان مثال نیروهای آیرودینامیکی.

۲- برهم کنش بین خود قطرات یعنی برخورد قطرات با یکدیگر بعد از تشکیل.

همانطور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، فرآیند اسپری کردن به خصوصیات مواد (سوسپانسیون و یا مایعی که قرار است اسپری شود)، طراحی دستگاه و تنظیمات مربوط به پارامترهای عملیاتی مانند فشار و دما وابسته است و کیفیت محصول نهایی به لحاظ اندازه ذرات، توزیع، یکنواختی و مورفولوژی آنها تحت تاثیر این فاکتورها می‌باشد. اگرچه عمدتاً بهینه سازی این متغیرها با تکنیک سعی و خطا (Trial & Error) حاصل می‌شود اما در عین حال درک درست از دستورالعمل‌های اساسی منجر به طراحی هوشمندانه تجهیزات می‌شود [۴۰-۴۲].

Archive of SID

## بخش ۹- مزایا و کاربردهای دستگاه پودر میکرونیزه

۱- توانایی تولید پودر در یک مرحله با یک سیستمی که قادر است کاملاً بطور اتوماتیک عمل

کند و امکان بررسی متغیرهای موثر در این فرآیند بطور همزمان

۲- امکان استفاده از این دستگاه برای مواد متنوع با ویژگی‌ها متفاوت (محلول، دوغاب، جامد،

ذوب شده و سوسپانسیون)، مواد حساس و یا مقاوم به دما (نکته: برای مواد جامد و سخت تر

امکان پودر شدن بدون نیاز به حلال میسر است)

۳- داشتن محصولاتی با خصوصیات قابل کنترل از طریق تغییر پارامترهای عملیاتی و طراحی

نازل‌ها

۴- مورفولوژی منحصر به فرد ذرات (عمدتاً کروی) با توزیع اندازه ذرات یکنواخت

۹-۱ کاربردهای دستگاه پودر میکرونیزه

۹-۱-۱ کاربردهای غذایی:

۱- پروتئین‌های خوراکی

۲- ذرت و محصولاتی بر پایه گندم با هدف نانویی

۳- شکر و نمک

۴- طعم دهنده‌ها و افزودنی‌ها

۹-۱-۲ کاربردهای صنعتی:

۱- مواد پاک کننده، صابون‌ها، مواد فعال سطحی



۲-نگدانه‌ها، اسپری‌های رنگ و پرینترهای جوهر افشان

۳-فرمول‌های آئروسول

۴-مواد سرامیکی و پودرهای متالوژی

۵-جذب گردو غبار حاصل از فرآیند برش در کارخانه‌های سنگ بری

Archive of SID





## فصل دوم

### طراحی دستگاه

Archive of SID

## بخش ۱- مراحل ساخت دستگاه (محاسبات و نقشه‌های مهندسی)

در راستای ساخت دستگاه تولید پودر میکرونیزه پیشنهادی، بعد از انجام مراحل مطالعاتی و جمع آوری برخی نتایج علمی موجود اقدام به انجام محاسبات مهندسی لازم برای طراحی دستگاه و تهیه ده شیت نقشه‌های مهندسی شد. به منظور ساخت این دستگاه با شرکت فراز سازه که در منطقه نظر آباد قزوین می‌باشد مکاتباتی انجام گرفت و کار ساخت دستگاه با نظارت مستقیم جناب آقای مهندس ابوالحسنی در اواخر بهمن ماه سال ۹۵ شروع شد. کلیه لوازم مورد نیاز برای ساخت دستگاه در سریعترین زمان ممکن در اختیار مهندس ابوالحسنی و کادر ایشان قرار گرفت. سیکلون طراحی شده از کارگاه جوشکاری آرگون بعد از رفع نواقص مشخص شده در تاریخ ۹۶/۴/۳۰ تحویل گرفته شد و در اختیار آقای مهندس ابوالحسنی قرار گرفت تا با تطبیق اندازه‌های آن محل نصب بر روی پلت فرم مشخص شود. در تاریخ ۹۶/۵/۳۰ فن سانتریفیوژی مورد نیاز تهیه و با الحاق به دیگر قطعات بر روی پلت فرم نصب شد.

### ۱-۱ محاسبات طراحی اولیه دستگاه تولید پودر میکرونیزه

این دستگاه نازل‌هایی با دو سیال دارد که این نوع خاص جهت تولید پودرهایی با اندازه ذرات منظم کاربرد دارد. انرژی موردنیاز برای اسپری کردن سیال مذاب از طریق جریان هوای فشرده توسط یک کمپرسور تولید هوای فشرده تأمین می‌گردد. محاسبات طراحی برای تولید پودرهایی با قطر تا ۲۰۰ میکرومتر با ظرفیت بیشینه تا ۳۰۰ کیلوگرم بر ساعت صورت پذیرفته است. بدیهی است که

دستگاهی با این طراحی با اعمال شرایط عملیاتی مختلف قادر به تولید ظرفیت‌های پایین تر و با ابعاد مختلف کوچکتر از ۲۰۰ میکرومتر خواهد بود. هدف از این محاسبات بدست آوردن ابعاد دستگاه یعنی قطر و ارتفاع آن است. روند محاسبات بدین صورت است که ابتدا با در نظر گرفتن ظرفیت بیشینه دستگاه، نرخ انتقال حرارت مورد نیاز برای فرایند و در ادامه شدت جریان هوای مورد نیاز جهت افشانه‌ای نمودن سیال مذاب ورودی و قطر مناسب جهت انجام این فرایند محاسبه می‌گردد. در ادامه جهت محاسبه ارتفاع مورد نیاز برای دستگاه این نکته در نظر گرفته می‌شود که فرایند پودر شدن سیال مذاب به دو قسمت تقسیم می‌گردد:

۱- انتقال حرارت تا رسیدن قطرات مذاب به نقطه انجماد

۲- سرد شدن پودرهای منجمد شده تا دمای نهایی و خروجی از دستگاه

خواص فیزیکی و شیمیایی ماده مذاب (ماده مذاب در طراحی اولیه استتاریک اسید در نظر گرفته شد):

$T_0 = 130 \text{ }^\circ\text{C}$	دمای اولیه و ورودی ماده مذاب
$l = 215.161 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	گرمای نهان ذوب ماده
$\rho_l = 839 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$	چگالی مذاب
$\rho_s = 1009 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$	چگالی جامد
$C_l = 2306 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه مذاب
$C_s = 2077 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه جامد
$K_l = 0.170 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	رسانندگی گرمایی مذاب
$K_s = 0.175 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	رسانندگی گرمایی جامد
$\mu_l = 7.7 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^{-3}$	ویسکوزیته مذاب

خواص فیزیکی و شیمیایی هوا:

$\mu_g = 1.82 \times 10^{-5} \text{ N.sec.m}^{-3}$	ویسکوزیته هوا
$C_g = 1007 \text{ J.(kg.K)}^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه هوا
$K_g = 0.0257 \text{ W.(m.K)}^{-1}$	رسانندگی گرمایی هوا
$\rho_g = 1.202 \text{ kg.m}^{-3}$	چگالی هوا

۱- موازنه انرژی:

در ابتدا با در نظر گرفتن ظرفیت  $300 \text{ kg/hr}$  طبق رابطه زیر نرخ انتقال حرارت جهت رسیدن به پودرهایی با دمای  $30$  درجه در خروجی محاسبه می‌گردد:

$$Q = L \times \{C_i \times (T_0 - T_i) + l + C_s \times (T_i - T_f)\}$$

که در آن  $T_0$ ،  $T_f$ ،  $T_i$  به ترتیب دمای نقطه انجماد ماده مذاب، دمای نهایی و خروجی و دمای ماده مذاب ورودی به داخل دستگاه است.

$$300 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times \{2.306 \times (130 - 70) + 215.161 + 2.077 \times (70 - 30)\} = 130980 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} = 36.38 \text{ KW}$$

۲- شدت جریان هوای ورودی

با داشتن نرخ انتقال حرارت کلی در دستگاه و با در نظر گرفتن اینکه این نرخ انتقال حرارت باید توسط جریان هوای ورودی به مذاب انتقال یابد می‌توان دبی جریان هوای ورودی مورد نیاز را محاسبه نمود:

فرض می‌گردد هوا با دمای  $15$  درجه وارد دستگاه می‌گردد و با دمای  $25$  از آن خارج می‌گردد.

$$G = \frac{Q}{C_g \times (T_i - T_f)}$$

$$\frac{130980 (KJ/hr)}{1.007 J \cdot (kg \cdot K)^{-1} \times (25 - 15)K} = 13006 \frac{kg}{hr} \times \frac{1}{1.202 kg \cdot m^{-3}} = 10821 \frac{m^3}{hr}$$

۳- قطر مورد نیاز برای دستگاه:

سرعت متوسط هوا در داخل محفظه برابر 1.3 m/s در نظر گرفته شد (در طراحی این دستگاه

سرعت متوسط هوا در داخل آن عموماً 0.5 تا 1.5 m/s در نظر گرفته می‌شود) [۴۳]:

$$D = \sqrt{\frac{1803.5}{\pi \times 0.22 \times 3600}} = 0.85 m = 85 cm$$

بنابراین قطر دستگاه ۸۵ cm محاسبه گردید.

در ادامه هدف بدست آوردن زمان مورد نیاز برای انجماد کامل قطرات مذاب و سرد شدن پودرهای

حاصل است بنابر این دو زمان مورد نیاز است. با ضرب این زمان ها در سرعت سقوط پودرها می‌توان

طول مورد نیاز برای رسیدن به پودر مورد نظر را بدست آورد که در واقع همان ارتفاع مطلوب دستگاه

خواهد بود.

۴- محاسبه ضرایب انتقال حرارت قطره در محفظه

جهت محاسبه ضرایب انتقال حرارت در درجه اول باید عدد بدون بعد رینولد<sup>۱</sup> (Re) مربوط به هر

پودر در حال سقوط را بدست آورد بنابراین باید ابتدا سرعت قطره‌ها در محفظه را بدست آورد:

۴-۱- سرعت نهایی قطره

دستگاه برای ذرات با حداکثر قطر  $200 \mu\text{m}$  طراحی خواهد شد و محاسبات با این قطر انجام

می‌پذیرد:

$$dp_1 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

برای محاسبه سرعت سقوط ذره از روش حدس و خطا استفاده شد. در ابتدا یک سرعت متوسط برای

قطره حدس زده شد:

$$v_r = 2 \text{ m. s}^{-1}$$

بر این اساس با داشتن خواص فیزیکی ماده، سرعت قطرات و همچنین اندازه آن می‌توان عدد رینولد

(Re) آن را محاسبه نمود.

$$Re = \frac{\rho_g \times v_r \times 2 \times d_p}{\mu_g} = \frac{1.202 \times 2 \times 2 \times 10^{-4}}{1.82 \times 10^{-5}} = 26$$

مقدار ضریب مقاومت حرکت سقوطی قطره<sup>۲</sup> ( $C_w$ ) را بر اساس Re می‌توان از روش‌های زیر به دست

آورد:

<sup>۱</sup> Reynold

<sup>۲</sup> Resistance Coefficient

If  $Re \leq 1$ , then  $c_w = \frac{24}{Re}$  and

$$v_p = \frac{(\rho_s - \rho_g)g}{18\mu_g} d_p^2 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1} \text{ (Stokes' Law)}$$

If  $10^3 < Re < 10^5$ , then  $c_w = 0.43$  and

$$v_p = 1.76 \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_g}} d_p \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$$

If  $1 < Re < 10^3$ , Figure should be used.

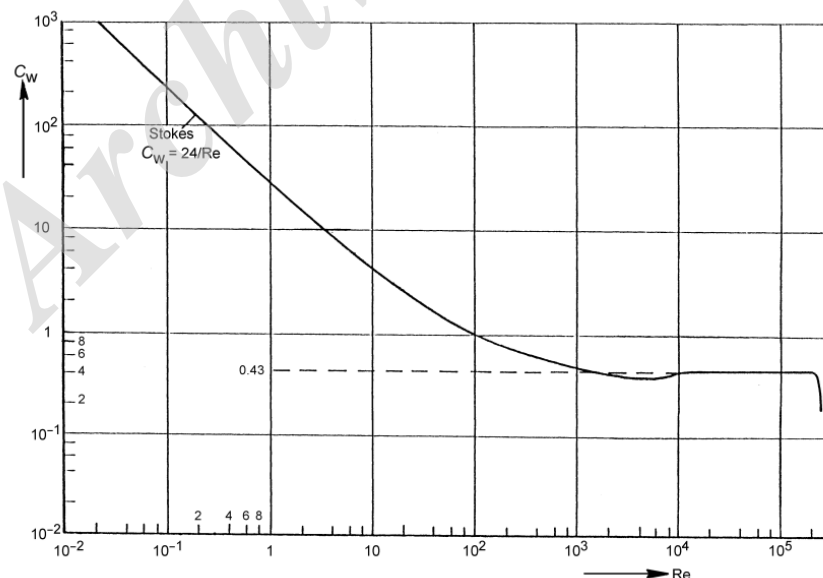
و سپس با داشتن  $v_r$  و  $C_w$  باید تساوی دو طرف معادله زیر را بررسی نمود و در صورت عدم تساوی

حدس سرعت  $v_r$  را تغییر داد تا معادله برقرار گردد [۴۴]:

$$\frac{\pi}{6} \times (d_p)^3 \times (\rho_s - \rho_g) \times g = C_w \times \frac{\pi}{4} \times (d_p)^2 \times \frac{1}{2} \times \rho_g \times v_r^2$$

بنابراین با توجه به اندازه  $Re$  برابر با ۲۶ از نمودار شکل ۱-۱ زیر می‌توان  $C_w$  را برای آن به دست

آورد که در  $Re$  موردنظر برابر با ۱.۵۸ به دست آمد.



شکل ۱-۱- ضریب مقاومت ذره در حال سقوط بر اساس  $Re$  (در محدوده  $1 < Re < 1000$ )

مقادیر بدست آمده را در معادله جایگذاری نموده و مقدار  $v_r$  جدید محاسبه می‌گردد:

$$\frac{\pi}{6} \times (4 \times 10^{-4})^3 \times (1009 - 1.202) \times 9.81 = 1.3 \times \frac{\pi}{4} \times (4 \times 10^{-4})^2 \times \frac{1}{2} \times 1.202 \times v_r^2$$

از حل این معادله  $v_r$  برابر با 1.17 m/s به دست آمد که با حدس اولیه (2 m/s) تفاوت دارد. لذا

1.17 را به عنوان حدس دوم در نظر گرفته و این مسیر را ادامه می‌دهیم. در نهایت  $v_r=1.04$

m/s و  $Re=13$  برای پودرهای مورد نظر به دست آمد.

۴-۲- ضریب انتقال حرارت جابجایی

جهت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی قطره در حال سقوط از معادله فراسلینگ<sup>۱</sup> استفاده

شد [۴۵]:

$$Re = 13$$

عدد پرنتل<sup>۲</sup> هوا محاسبه می‌گردد:

$$Pr = \frac{\mu_g C_g}{K_g} = \frac{1.82 \times 10^{-5} * 1007}{0.0257} = 0.713$$

عدد ناسلت<sup>۳</sup> هوا محاسبه می‌گردد:

$$Nu = 2 + 0.552 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3}$$

$$Nu = 2 + 0.552 \times 13^{1/2} \times 0.713^{1/3} = 3.828$$

بنابراین می‌توان ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $\alpha_0$ ) را محاسبه نمود:

<sup>1</sup> Frossling

<sup>2</sup> Prandtl

<sup>3</sup> Nusselt



$$Nu = \frac{\alpha_0 d_p}{K_g} = 3.828$$

$$\alpha_0 = \frac{K_g}{d_p} \times 3.828 = \frac{0.0257}{2 \times 10^{-4}} \times 5.44 = 491.9$$

قطره مذاب در مسیر سقوط در داخل دستگاه ابتدا خنک شده تا به نقطه انجماد برسد. پس از انجماد

نیز انتقال حرارت همچنان صورت می‌پذیرد تا پودر تولید شده خنک‌تر شود و به دمای مورد نظر

برسد. بنابراین باید دو زمان را محاسبه نمود: زمان انجماد قطره ( $t_{s1}$ ) و زمان خنک شدن پودر ( $t_c$ )

تشکیل شده.

۵- محاسبه طول مورد نیاز برای انجماد قطره

۵-۱- زمان مورد نیاز برای انجماد قطره

برای بدست آوردن زمان انجماد قطره از رابطه ارائه شده توسط بورتزکی استفاده شد [۴۶]:

عدد انتقال فاز با داشتن دماهای ابتدایی و انتهایی و گرمای نهان ذوب (گرمای کریستال شدن) به

دست می‌آید:

$$Ph = \frac{1 + C_1 \times (T_0 - T_1)}{C_s \times (T_1 - T_f)} = \frac{215161 + 2306 \times (130 - 70)}{2077 \times (70 - 30)} = 4.26$$

عدد بایوت<sup>۱</sup> که در واقع از تقسیم مقاومت داخلی انتقال حرارت بر مقاومت داخلی در برابر انتقال

حرارت است، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Bi = \frac{\alpha_0 \times d_p}{2 \times K_s} = \frac{491.9 \times 2 \times 10^{-4}}{2 \times 0.175} = 0.281$$

<sup>۱</sup> Biot

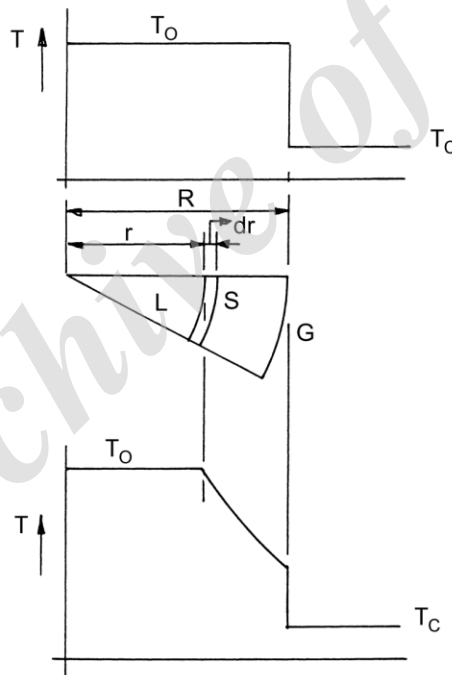
عدد فوریه<sup>۱</sup> که در بسیاری از مسائل مرتبط با انتقال حرارت غیر پایدار کاربرد دارد را می‌توان با داشتن عدد بایوت و عدد تغییر فاز به دست آورد:

$$Fo = Ph \times \left( \frac{1}{6} + \frac{1}{3 \times Bi} \right) = 4.26 \times \left( \frac{1}{6} + \frac{1}{3 \times 0.281} \right) = 5.76$$

ضریب  $\alpha$  به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\alpha = \frac{K_s}{C_s \times \rho_s} = \frac{0.175}{2077 \times 1009} = 8.35 \times 10^{-8}$$

نمودار شکل ۱-۲ مکانیسم انجماد قطرات را نشان می‌دهد:



شکل ۱-۲- پروفایل دمایی در درون قطرات کروی در حال انجماد

طبق شکل ۱-۲- معادله دیفرانسیل تغییرات فاز در کره به صورت زیر است:

$$\alpha_0 4\pi R^2 (T_l - T_f) dt = -\rho_s i 4\pi r^2 \cdot dr$$

<sup>۱</sup> Fourier

با انتگرال‌گیری از این معادله از  $r=0$  تا  $r=R$  و جایگذاری عدد  $F_0$  معادله زیر برای زمان مورد نیاز برای انجماد کامل قطره حاصل می‌شود:

$$t_{s1} = \frac{F_0 \times d_p^2}{4 \times \alpha} = \frac{5.76 \times (2 \times 10^{-4})^2}{4 \times 8.35 \times 10^{-8}} = 0.69 \text{ sec}$$

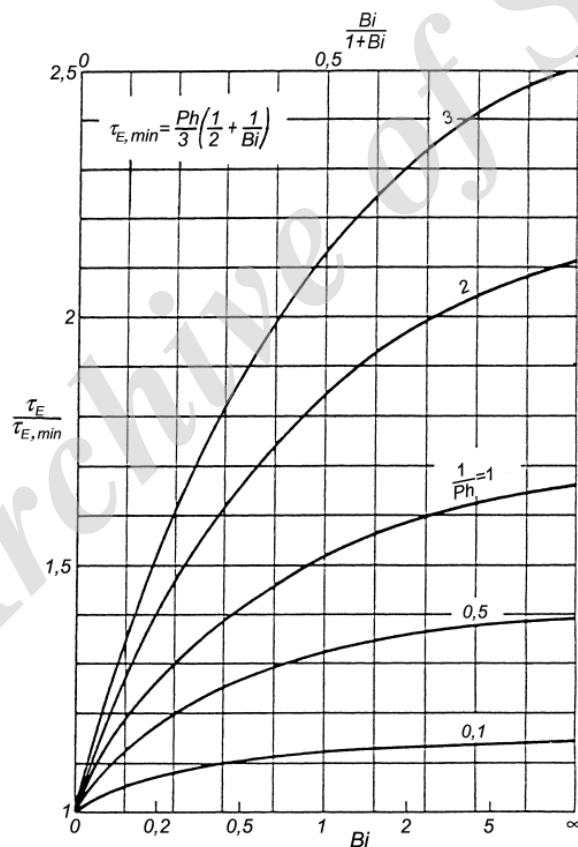
با داشتن مقادیر  $Bi$  و  $Ph$  و با استفاده از نمودار شکل ۱-۳ می‌توان ضریب اصلاح زمان انجماد را پیدا

نمود.

$$\frac{\tau_E}{\tau_{E,min}} = 1.1$$

$$\tau_{E,min}$$

$$t_{s1} = 1.1 \times 0.69 = 0.76 \text{ sec}$$



شکل ۱-۳- ضریب اصلاح زمان مورد نیاز برای خشک شدن قطره.

۴۵ - طول مورد نیاز برای انجماد کامل

با ضرب نمودن زمان مورد نیاز برای انجماد که در بخش قبل محاسبه گردید در سرعت سقوط ذره می توان طول مورد نیاز برای انجماد قطره را بدست آورد:

$$0.759 \text{ sec} \times 1.04 \frac{m}{s} = 0.79 \text{ m} = 79 \text{ cm}$$

۶- محاسبه طول مورد نیاز برای سرد شدن پودر تولید شده در داخل دستگاه

۶-۱- زمان مورد نیاز برای سرد شدن پودر

در سرد شدن پودر منجمد شده معادله انتقال حرارت سرد شدن پودر زیر حاکم است [۴۳]:

$$Q_c = \phi_p C_s (T_0 - \bar{T}) W$$

فرض بر این است که قطره در نقطه ذوب وارد ناحیه سرد شدن می گردد.

میزان حرارتی که از کره خارج می گردد به صورت زیر است:

$$Q_c = k_c \times F \times \Delta T_m \times W$$

ضریب انتقال حرارت  $k_{ch}$  از معادله زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{k_{ch} R^2} = \frac{1}{\alpha_o R^2} + \frac{2 \times (R - \frac{R}{2})}{K_s R^2}$$

شعاع قطره باید در محاسبات جایگذاری گردد:

$$R = \frac{d_p}{2} = 10^{-4} \text{ m}$$

با داشتن ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $\alpha_o$ ) خواهیم داشت:

$$\frac{1}{\alpha_o R^2} = 203307 W^{-1}.K$$

$$\frac{2 \times (R - \frac{R}{2})}{K_s R^2} = \frac{2 \times (5 \times 10^{-5})}{0.175 \times (10^{-4})^2} = 57142$$

$$\frac{1}{k_c R^2} = 203307 + 57142 = 260450$$

$$k_c = \frac{1}{260450 \times (10^{-4})^2} = 383.95$$

و در ادامه زمان مورد نیاز برای سرد شدن پودر تا دمای نهایی  $30^\circ C$  به دست می‌آید:

$$t_c = \frac{\rho_s C_s d_p}{6k_c} \times \log \frac{T_i - \bar{T}}{T_o - \bar{T}} = 1.095 \text{ sec}$$

۶ - طول مورد نیاز برای سرد شدن پودر

با ضرب نمودن زمان مورد نیاز برای سرد شدن پودر که در بخش قبل محاسبه گردید در سرعت سقوط ذره می‌توان طول مورد نیاز برای انجماد قطره را بدست آورد:

$$1.095 \text{ sec} \times 1.04 \frac{m}{s} = 1.14 \text{ m}$$

۷ - ارتفاع کل دستگاه جهت رسیدن به پودر با قطر زیر  $200 \mu m$ :

ارتفاع کل مورد نیاز برای رسیدن به پودرهای مورد نظر از جمع دو ارتفاع بدست آمده در بخش ۵ و

۶ محاسبه می‌گردد:

$$H_{total} = 0.79 + 1.14 = 1.93 \text{ m}$$

بنابراین ارتفاع برج  $1/93 \text{ cm}$  محاسبه گردید.

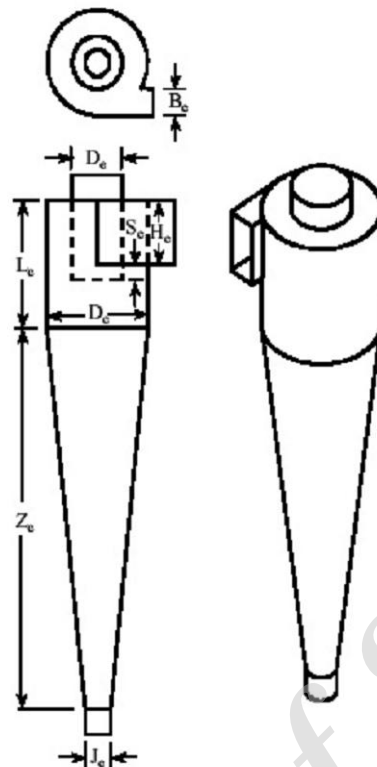
بنابراین طراحی و ساخت دستگاهی با این ابعاد می‌تواند پودرهایی تا قطر ۲۰۰ میکرومتر و با ظرفیت ۳۰۰ کیلوگرم بر ساعت را تولید کند. بدیهی است که دستگاه با اعمال شرایط عملیاتی مختلف از جمله شدت جریان هوا، نوع و اندازه نازل‌ها، شدت جریان سیال مذاب و دیگر پارامترها توانایی تولید پودرهایی با اندازه‌های کوچک‌تر را نیز خواهد داشت.

جهت طراحی سیکلون جداکننده پودرها اصول زیر مورد نظر قرار گرفت:

#### ۱ - طراحی سیکلون جداکننده

بر اساس روش طراحی سیکلون دانشگاه تگزاس A&M (TCD) ابتدا باید یک سرعت بهینه برای ورودی سیکلون تخمین زد. بر اساس این طراحی برای سیکلون‌های نوع 1D3D (سیکلون‌هایی با ارتفاع استوانه و قسمت مخروطی پایینی هم اندازه) سرعت  $16 \pm 2 \text{ m/s}$  در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴-۱). این سرعت بهینه بر اساس مدل TCD موجب می‌گردد که سیکلون بیشترین بازدهی و کمترین افت فشار را داشته باشد. بر این اساس قطر سیکلون از رابطه زیر بدست می‌آید [۴۷-۵۲]:

$$D_c = \sqrt{\frac{8Q}{V_i}} = \sqrt{\frac{8 \times 250}{3600 \times 15}} = 19.24 \text{ cm} \sim 20 \text{ cm}$$



$B_c = D_c/4$	$H_c = D_c/2$	$S_c = D_c/8$
$D_e = D_c/2$	$J_c = D_c/4$	$L_c = 1 \cdot D_c$
$Z_c = 3 \cdot D_c$		

شکل ۱-۴- نمای شماتیک سیکلون مدل 1D3D

بر این اساس ابعاد زیر برای سیکلون جداکننده تخمین زده شد:

$B_c = D_c/4 = 5 \text{ cm}$   
 $H_c = D_c/2 = 10 \text{ cm}$   
 $S_c = D_c/8 = 2.5 \text{ cm}$   
 $D_e = D_c/2 = 10 \text{ cm} (6)$   
 $L_c = 1 \times D_c = 20$   
 $Z_c = 3 \times D_c = 60 \text{ cm} (55)$   
 $J_c = D_c/4 = 5 \text{ cm} (10)$

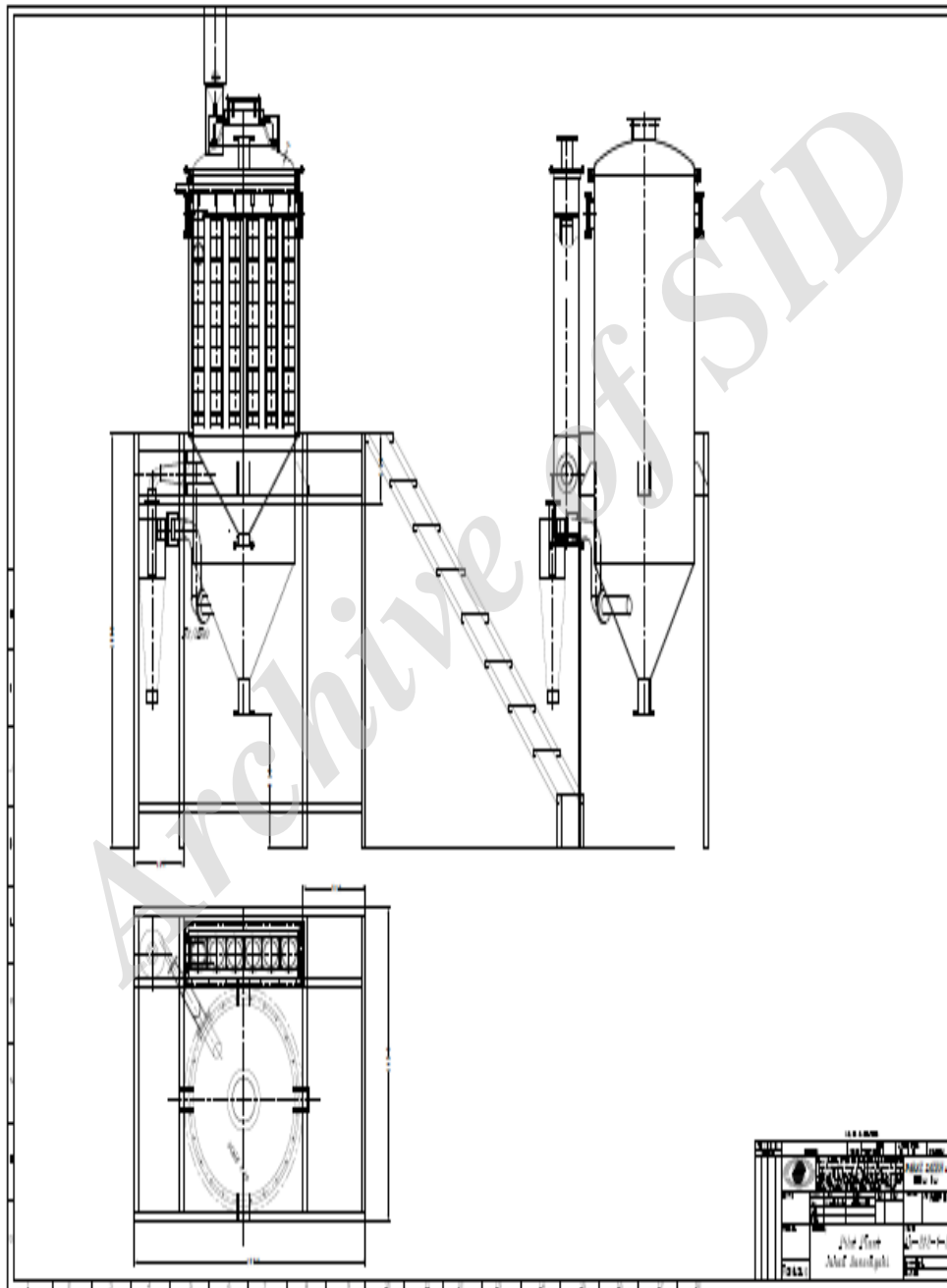
البته با توجه به برخی الزامات تجربی و فرایندی در طراحی، ابعاد سیکلون بر مبنای این محاسبات و

اندازه‌ها با کمی تفاوت تعیین گردید.

## ۴۱ نقشه‌های مهندسی دستگاه تولید پودر میکرونیزه

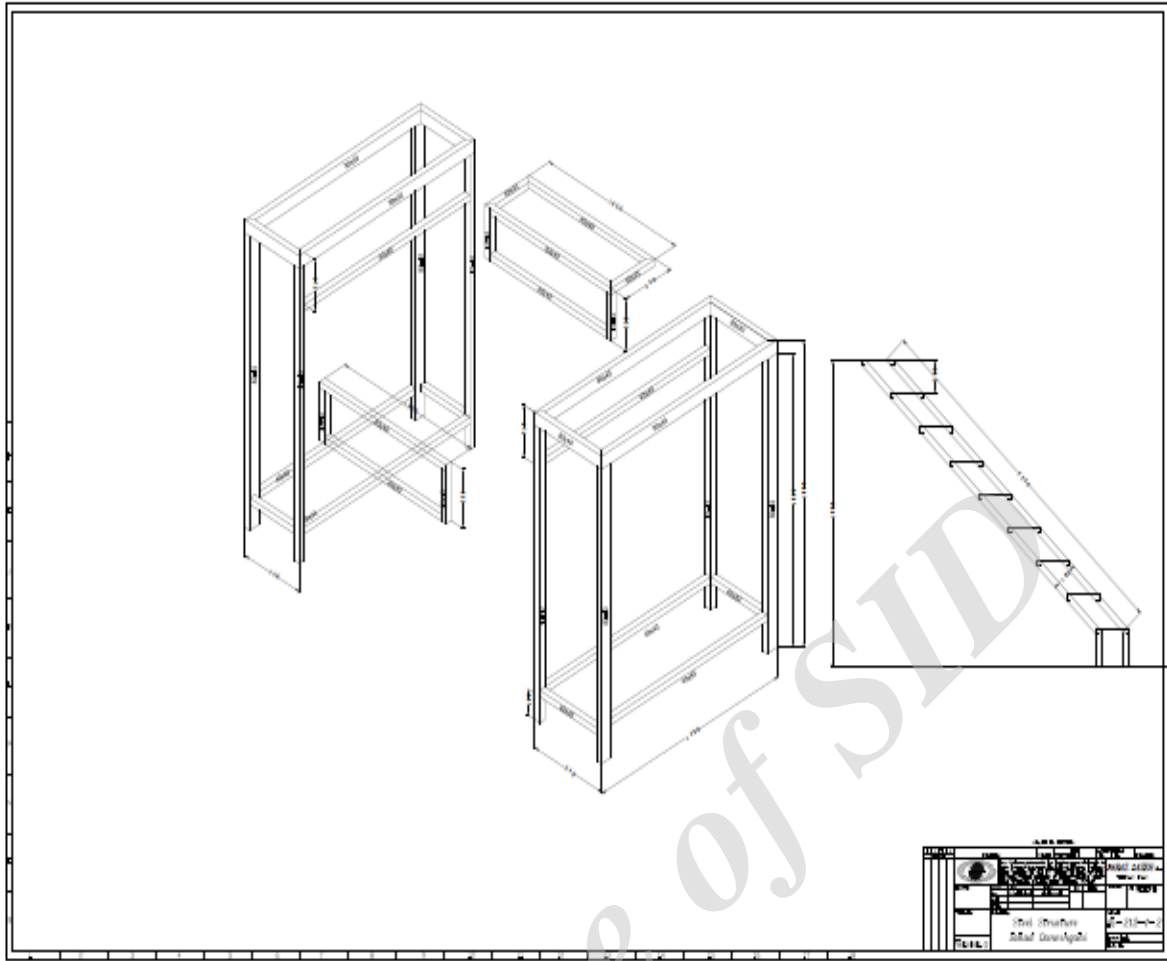
در شکل‌های ۱-۵ تا ۱-۱۴ تصاویری از نقشه‌های مهندسی دستگاه و در شکل‌های ۱-۱۵ تا ۱-

۱۹ مراحل ساخت دستگاه نشان داده شده است.

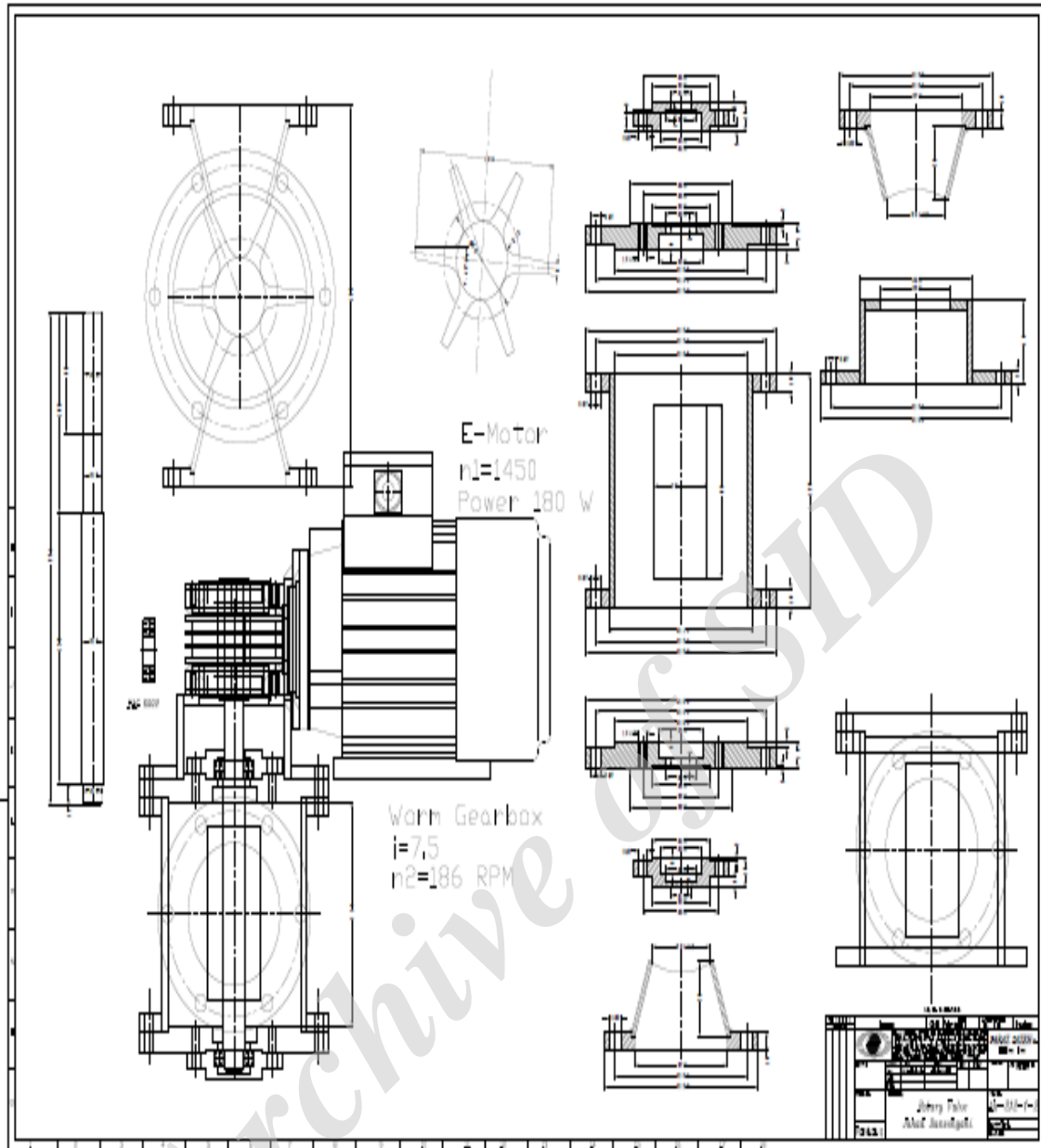


۱-۵- نقشه اجزای تشکیل دهنده سیستم پودرساز و نحوه چینش آنها روی پلت فرم.



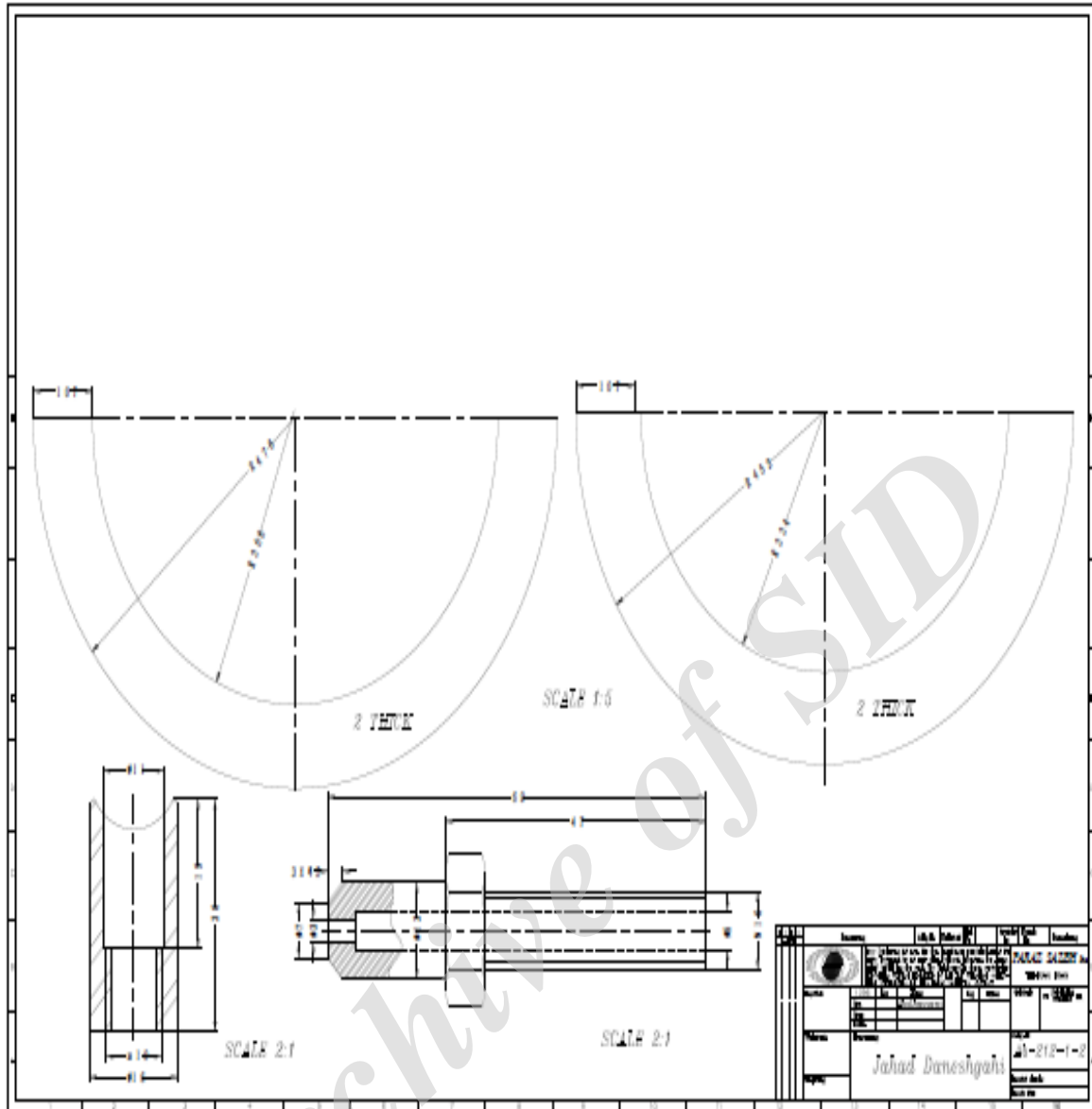


۱-۶- نقشه پلت فرم سیستم پودر ساز و نحوه اتصال آنها به یکدیگر.



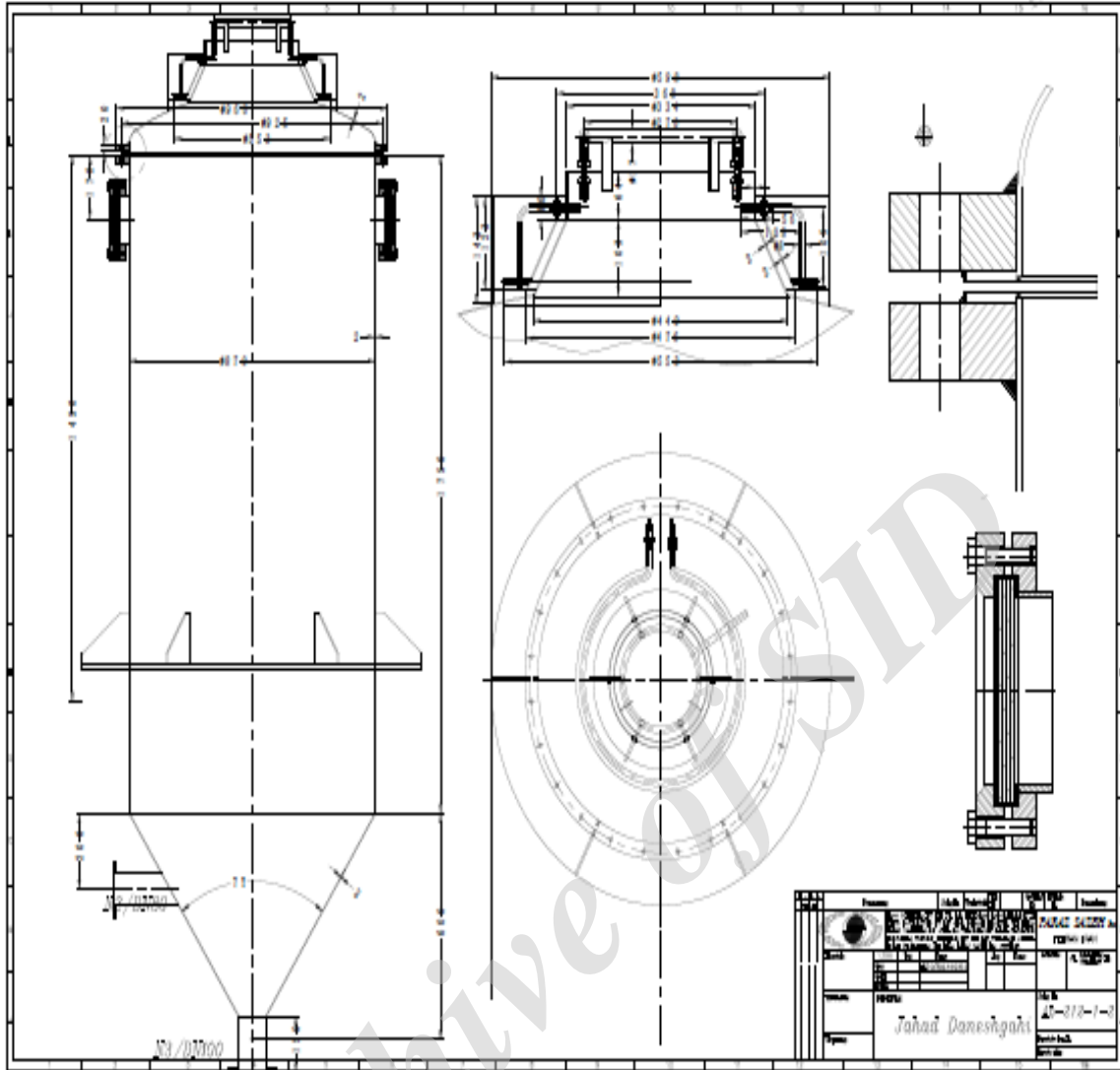
۷-۱- نقشه اجزای روتاری والو سیستم پودرساز.

طراحی و ساخت دستگاه پودر میکرونیزه جهت . . .



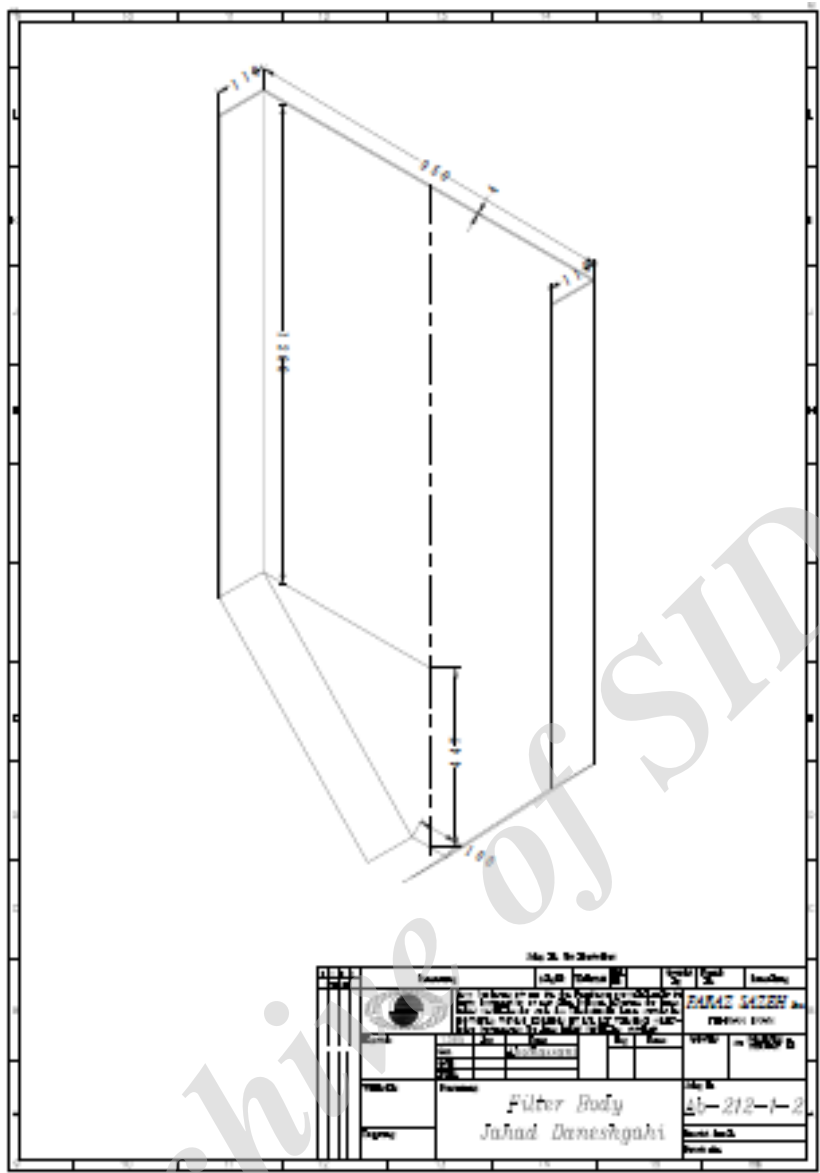
۸-۱- نقشه هد نازل.

طراحی و ساخت دستگاه پودر میکرونیزه جهت . . .

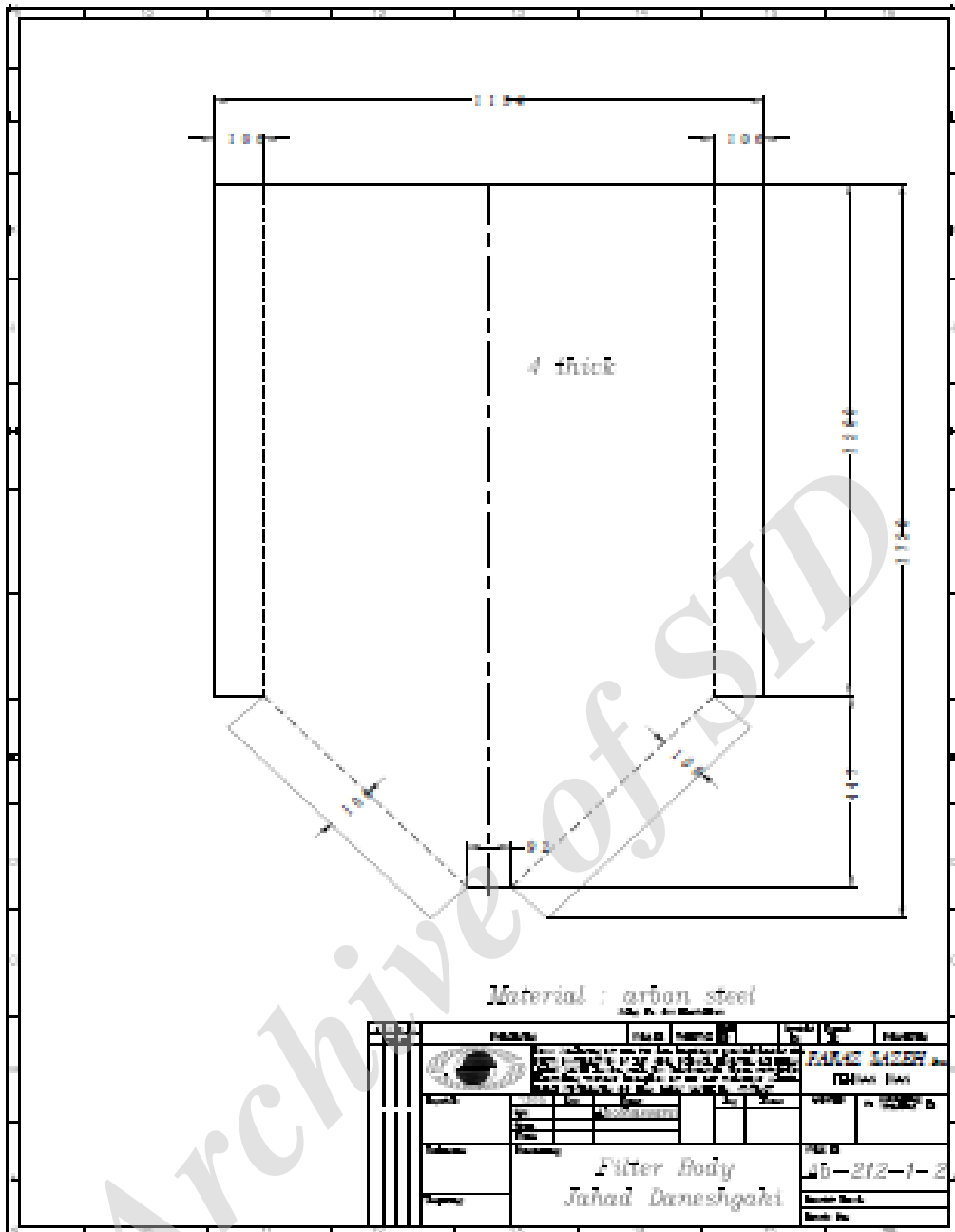


۹-۱- نقشه حوضچه مذاب و هیتر مربوطه و محل قرار گیری نازل های شش گانه سیستم پودر ساز.

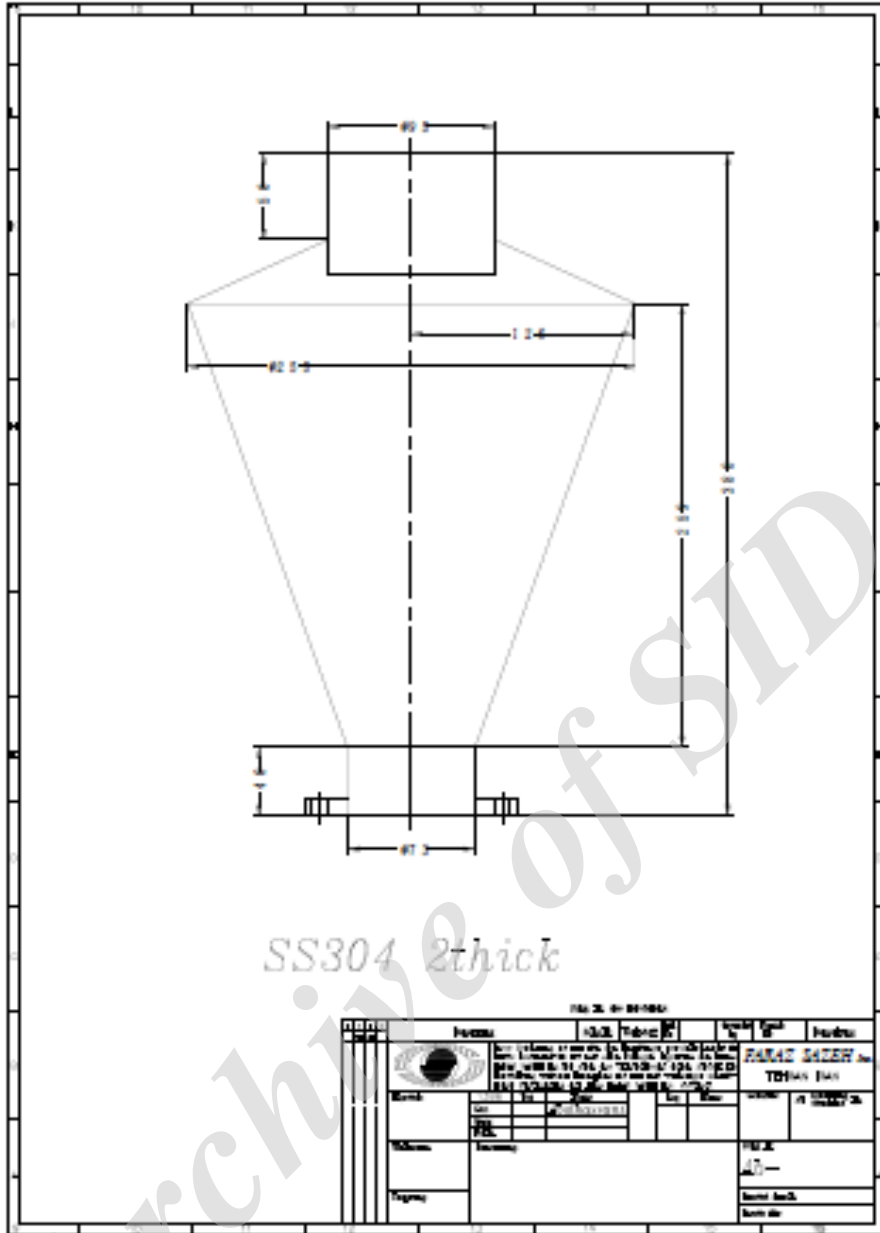




۱۱-۱- کروکی اولیه فیلتر بگ.



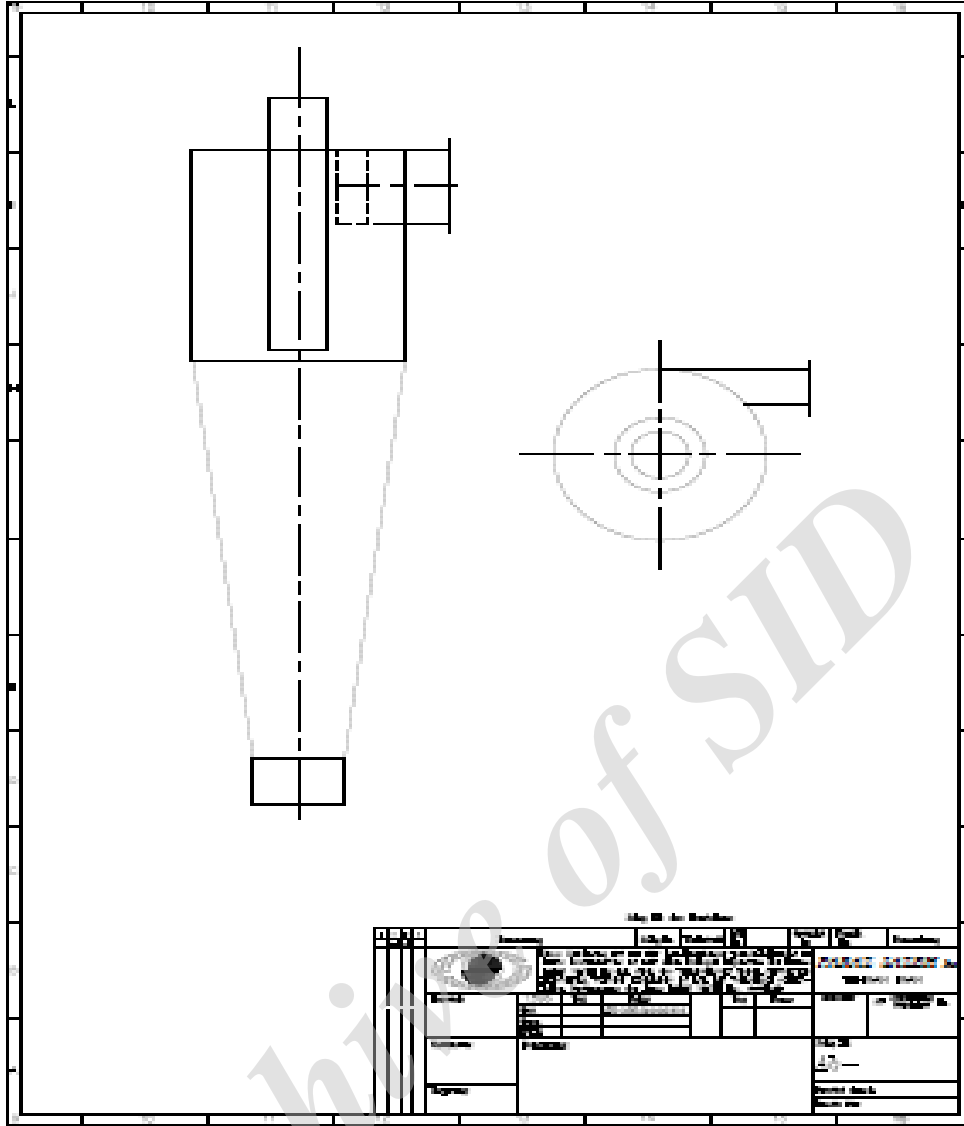
۱-۱۲- نقشه باز شده وجوه فیلتر بگ سیستم پودرساز.



۱-۱۳- نقشه تریپ پودر.

طراحی و ساخت دستگاه پودر میکرونیزه جهت ...





۱۴-۱- کروکی سیکلون.



شکل ۱-۱۵- ساخت پلت فرم و نصب مخزن انبساط و فیلتر بر روی آن.



شکل ۱-۱۶- ساخت مخزن تامین مذاب و رابطها با سیکلون.





شکل ۱-۱۷- ساخت ترپ پودر و روتاری والو و نصب آنها به سیکلون.



شکل ۱-۱۸- ساخت و تنظیم نازل با شش هد پاشش و نصب آن بر روی درب مخزن انبساط.





شکل ۱-۱۹- انتقال قطعات دستگاه به دانشکده فنی و اقدام به مونتاژ آنها در تاریخ ۱۳۹۶/۰۵/۰۹

## بخش ۲- بررسی عملکرد دستگاه

در بررسی عملکرد دستگاه پودر ساز طراحی شده سه نمونه ترکیب آلی شامل یک اسید آلی (استئاریک اسید)، یک استر آلی (گلیسرین مونو استئارات (GMS)) و در نهایت مخلوطی از این اسید و استر آلی به همراه اجزای دیگر (SUN MIX) که از جمله محصولات تولیدی گروه فرآیندهای شیمیایی جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران نیز می‌باشد مورد ارزیابی قرار گرفت. پودرهای تهیه شده از این ترکیبات در دماهای مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM Scanning electron microscope)، دستگاه پراکندگی نور دینامیکی (DLS (Dinamic light scattering) و پراکندگی استاتیک نور لیزر (SLS (Static light scattering) بررسی شدند. روش میکروسکوپی پویش الکترونی (SEM) تصاویر با رزولوشن بالا و با عمق میدان طویل از سطح و نزدیک سطح نمونه تهیه می‌کند. SEM یکی از پرکاربردترین تجهیزات تحلیلی به دلیل ایجاد سریع تصاویر با جزئیات فوق العاده می‌باشد. پراکندگی نور دینامیکی (DLS) روش فیزیکی است که برای تعیین توزیع و سایز ذرات موجود در محلول‌ها و سوسپانسیون‌ها بر اساس حرکت براونی آنها استفاده می‌شود. این روش غیر مخرب و سریع با استفاده از تابش نور مرئی با طول موج ۶۳۳ نانومتر، برای تعیین اندازه ذرات در محدوده‌ی چند نانومتر تا میکرون به کار می‌رود. در آنالیز DLS پارامتری را بنام ضریب توزیع (PdI=polydispersity index) داریم که معیاری از آگلومره شدن ذرات می‌باشد و اگر PdI بزرگتر و مساوی ۰/۵ باشد در آنصورت ذرات آگلومره شده و نتایج غیرقابل قبول خواهد بود که خوشبختانه در مورد هر سه ترکیب مورد بررسی در طرح حاضر مقادیر PdI در رنج قابل قبول قرار

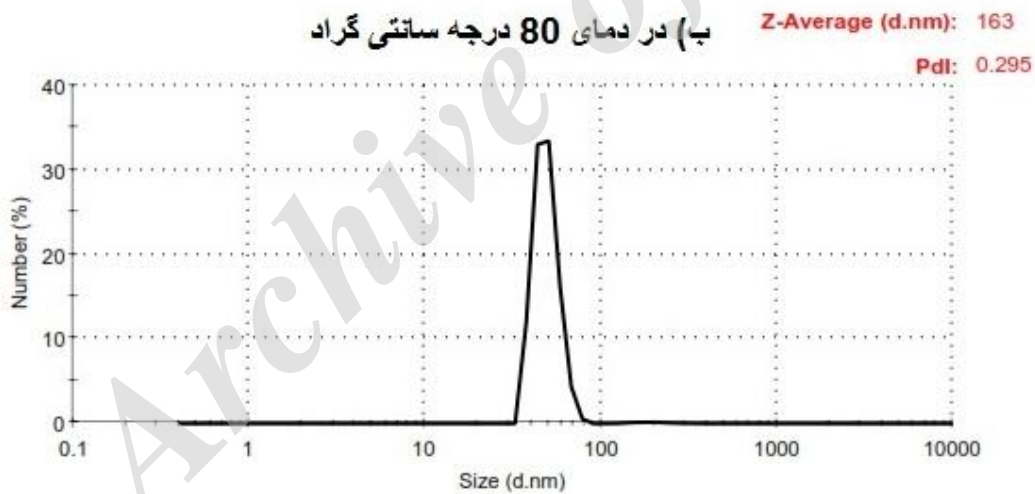
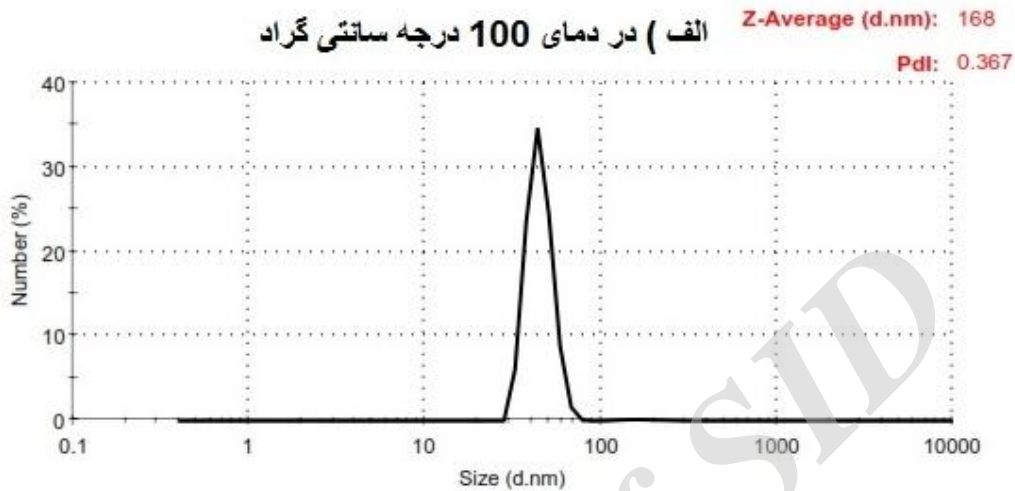
داشت. آنالیز SLS نیز روشی برای اندازه گیری ذرات با استفاده از روش پراکندگی استاتیک نور لیزر است که بر اساس الگوی نور پراکنده شده بر روی آشکارساز است. این الگوی نور پراکنده شده مجموعه ای از الگوهای پراکندگی است که توسط هر یک از ذرات ایجاد می شود. بوسیله این الگوی پراکندگی می توان اطلاعاتی از اندازه ذرات بدست آورد. این روش آنالیزی روشی سریع، نسبتاً ارزان و غیر مخرب برای اندازه گیری توزیع اندازه ذرات است. از این روش برای اندازه گیری ذراتی که اندازه آن ها بیش از ۱۰ میکرومتر است استفاده می شود.

نتایج نشان داد که برای اسید استئاریک بعنوان یک نمونه اسید آلی با نقطه ذوب  $69/3^{\circ}\text{C}$ ، براساس آنالیز DLS ذراتی با قطر متوسط ۱۶۳ و ۱۶۸ نانومتر به ترتیب در دو دمای ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد بدست آمد. بر این اساس می توان نتیجه گرفت که با تغییرات دمایی و افزایش ۲۰ درجه ای دما و در نتیجه تغییر ویسکوزیته در مورد این ترکیب تغییرات محسوسی را در اندازه ذرات در ابعاد نانو نداشتیم (شکل ۱-۲). از طرف دیگر بر اساس نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی نیز (شکل ۲-۲ و ۳-۲) ذراتی کروی در ابعاد میکرومتری نیز شناسایی شد. نتایج حاصل از آنالیز SLS نیز تایید کننده حضور ذرات با ابعاد میکرومتری می باشد (۲-۴) بدین ترتیب که در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد بیشترین فراوانی ابعاد ذرات در ۵۵ میکرومتر مشاهده شده و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد بیشترین فراوانی را در ابعاد ۲۴ میکرومتر داشتیم. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با استفاده از دستگاه طراحی شده برای این اسید آلی می توان ذراتی در ابعاد نانومتری و میکرومتری با

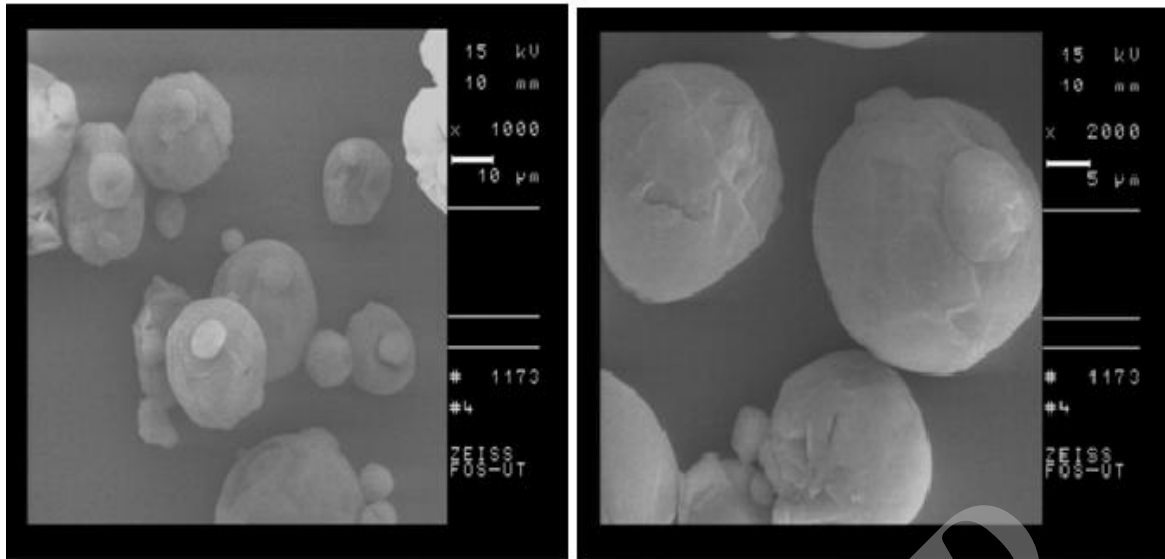


مورفولوژی کروی (که اغلب از مورفولوژی‌های مناسب در بسیاری از کاربردها نیز محسوب می‌شود)

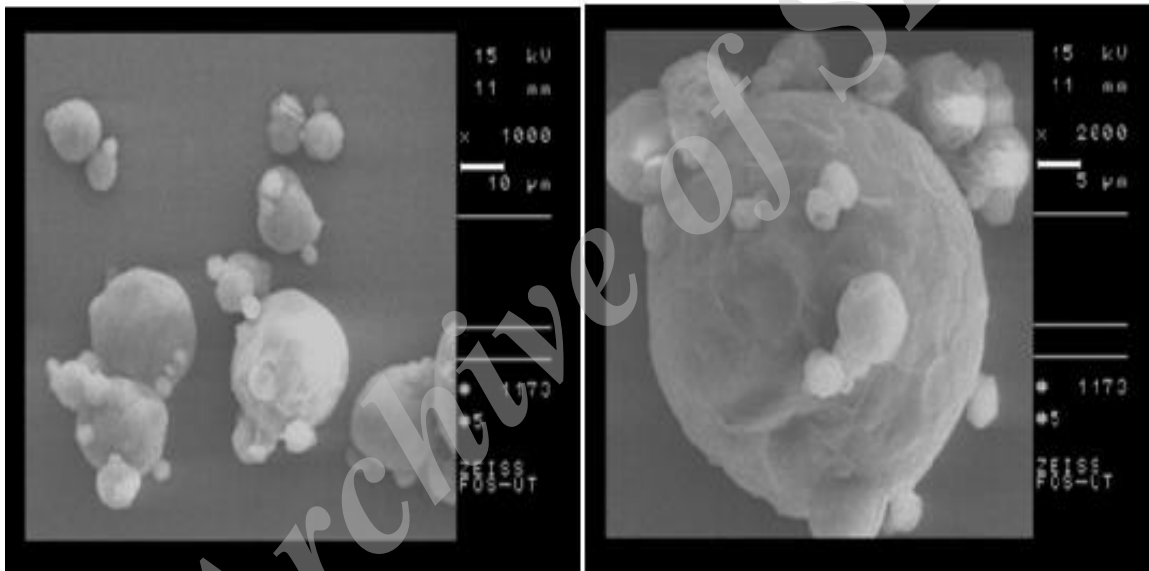
بدست آورد.



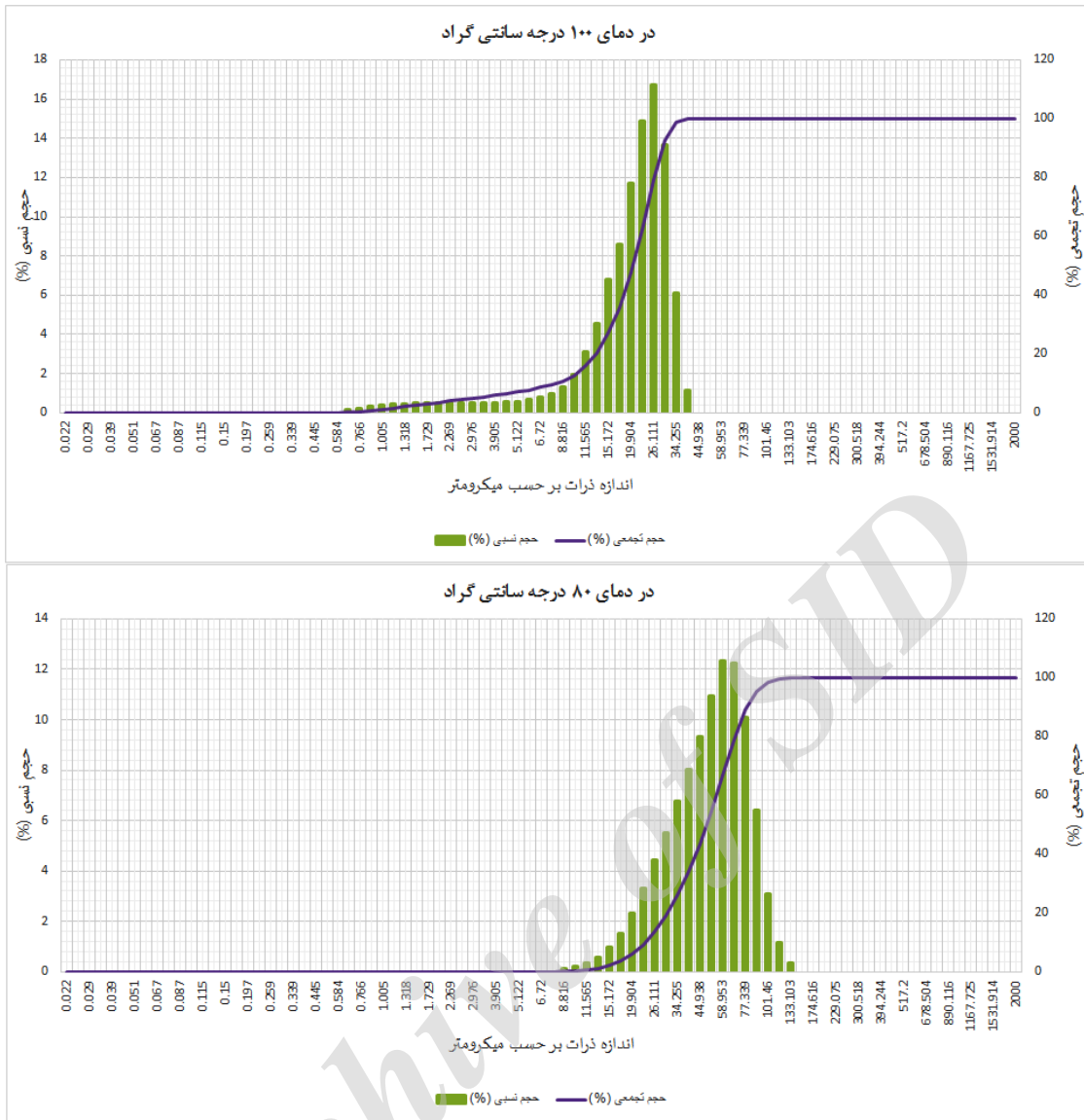
شکل ۱-۲- آنالیز DLS مربوط به استتاریک اسید در دو دمای ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد.



شکل ۲-۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه اسید آلی در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد.



شکل ۲-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه اسید آلی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد.

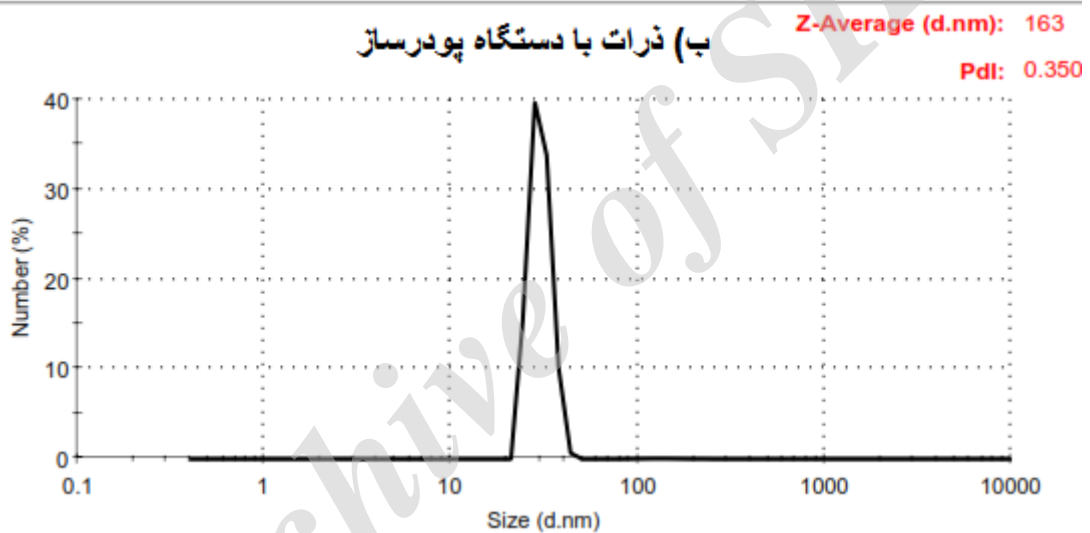
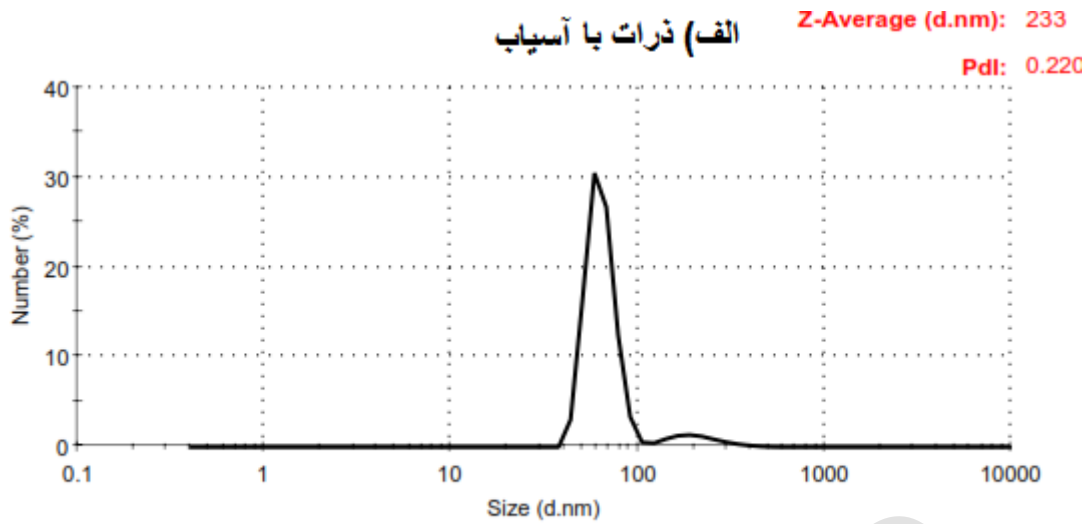


شکل ۲-۴- آنالیز SLS مربوط به استتاریک اسید در دو دمای ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد.

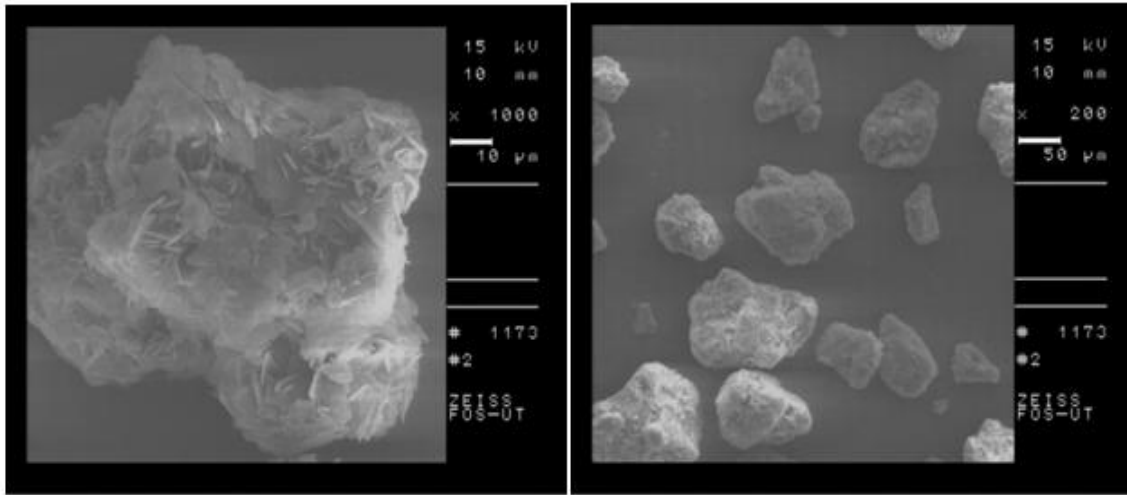
در مورد نمونه استر آلی (GMS) (نقطه ذوب  $60^{\circ}\text{C}$ )، ذرات بدست آمده از دستگاه پودر ساز طراحی شده با ذرات بدست آمده با روش آسیاب مقایسه شد. نتایج حاصل از آنالیز DLS ذراتی با قطر متوسط ۲۳۳ نانومتر حاصل از روش آسیاب و ذراتی با قطر متوسط ۱۶۳ نانومتر در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد را با دستگاه پودر ساز طراحی شده نشان داد (شکل ۲-۵). بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که در مورد روش آسیاب ذرات بهم چسبیده و اندازه ذرات بزرگتر شده است که این نتیجه با

تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی نیز قابل تایید است (شکل ۲-۶). مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی مورفولوژی ذرات با روش آسیاب کلوخه‌ای می‌باشد (شکل ۲-۶) در حالی که ذرات با دستگاه پودر ساز طراحی شده مورفولوژی کروی دارند (شکل ۲-۷). علاوه بر این نتایج حاصل از آنالیز SLS نیز حضور ذرات در ابعاد میکرومتری را نیز تایید می‌کند (شکل ۲-۸). بر این اساس ذرات بدست آمده با روش آسیاب دارای بیشترین فراوانی در ابعاد ۲۱۵ میکرومتری هستند اما ذرات بدست آمده با دستگاه پودر ساز در ابعاد ۴۷ میکرومتری از بیشترین فراوانی برخوردارند. بنابر نتایج ذرات بدست آمده توسط دستگاه پودر ساز طراحی شده در مقایسه با روش آسیاب دارای کیفیت بهتری به لحاظ ابعاد و مورفولوژی هستند.

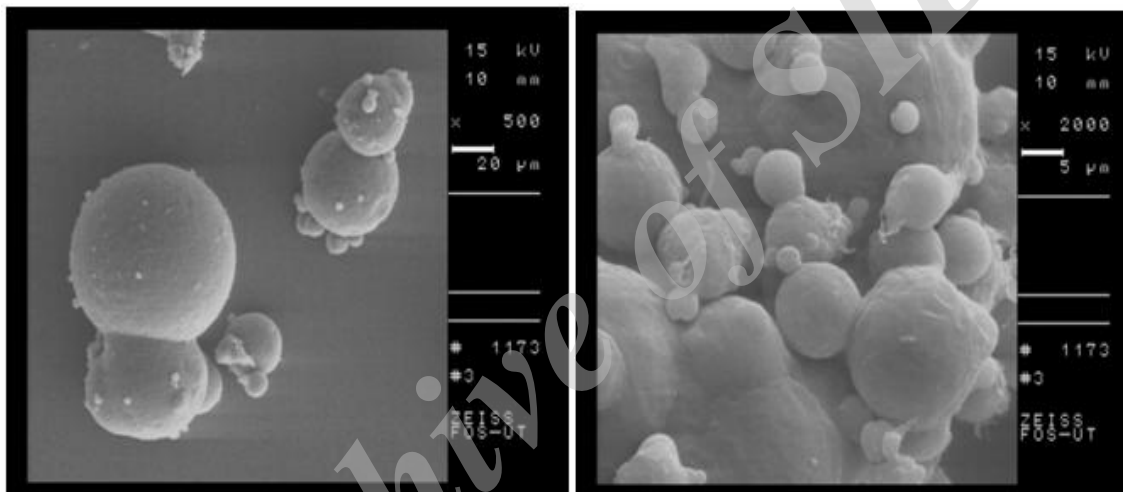
Archive of SID



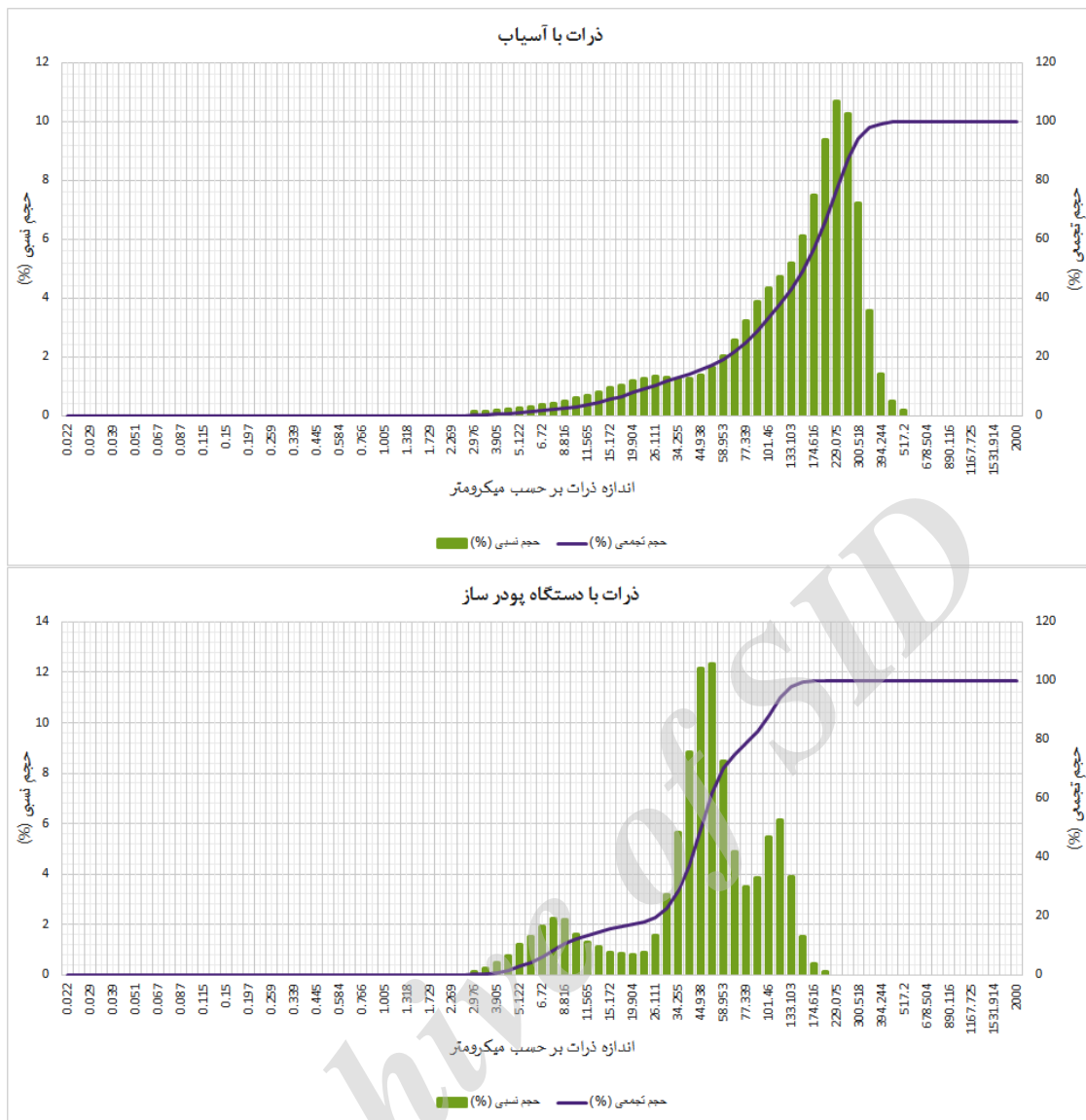
شکل ۲-۵- مقایسه آنالیز DLS مربوط به گلیسیرین مونو استئارات پودر شده با دو روش.



شکل ۲-۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه استر آلی با آسیاب.

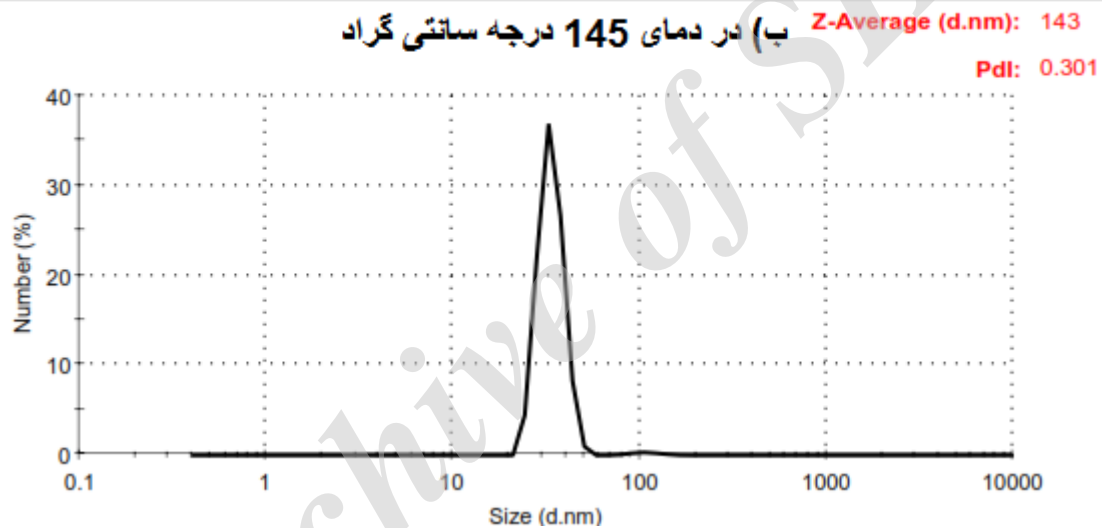
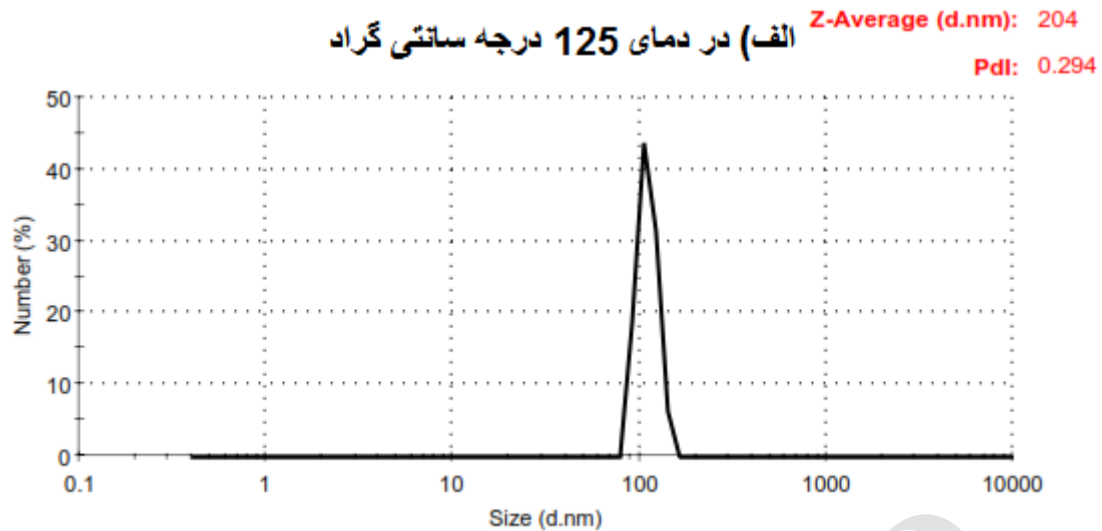


شکل ۲-۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه استر آلی با دستگاه پودر ساز طراحی شده.



شکل ۲-۸- مقایسه آنالیز SLS مربوط به گلیسرین مونو استئارات پودر شده با دو روش.

برای ترکیب آلی (SUN MIX) (نقطه ذوب  $120^{\circ}\text{C}$ ) که از فرآورده‌های تولیدی گروه فرایندهای شیمیایی جهاد دانشگاهی تهران است و مخلوطی از دو اسید و استر آلی اشاره شده نیز می‌باشد، در دو دمای  $125^{\circ}\text{C}$  و  $145^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد ذراتی با قطر متوسط  $204$  و  $143$  نانومتر مطابق با آنالیز DLS حاصل شد. در مورد این ترکیب آلی مخلوط عملاً با افزایش دما و کاهش ویسکوزیته سیستم ذراتی با اندازه‌های کوچکتر در ابعاد نانومتری بدست آمد (شکل ۲-۹).

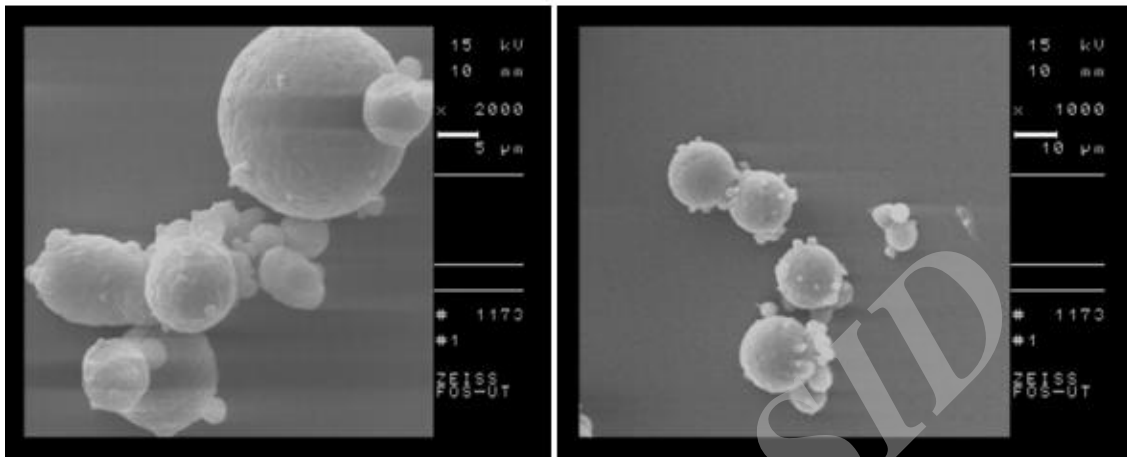


شکل ۹-۲- آنالیز DLS مربوط به SUN MIX در دو دمای ۱۲۵ و ۱۴۵ درجه سانتی گراد.

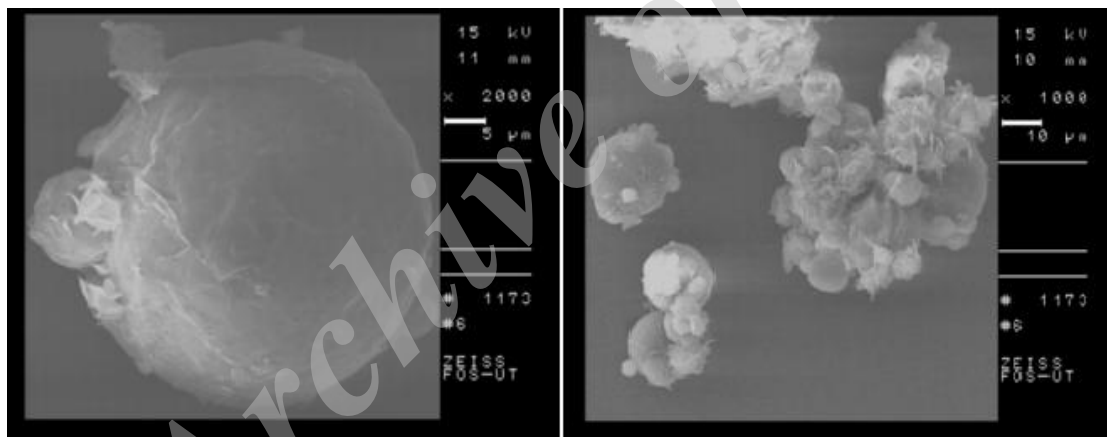
در شکل ۱۰-۲ و ۱۱-۲ نیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه SUN MIX نشان داده شده است. مطابق با این تصاویر نیز در دمای پایین تر اندازه ذرات بزرگتر است و از طرفی آگلومره شدن را نیز می توان تا حدی مشاهده کرد ولی با افزایش دما و کاهش ویسکوزیته ذراتی با مورفولوژی کروی بدست آمد. نتایج حاصل از آنالیز SLS نیز نشان می دهد (شکل ۱۲-۲) که در دمای ۱۲۵ درجه سانتی گراد اندازه ذرات با ابعاد ۱۴۲ میکرومتر از بیشترین فراوانی برخوردارند حال آنکه با افزایش



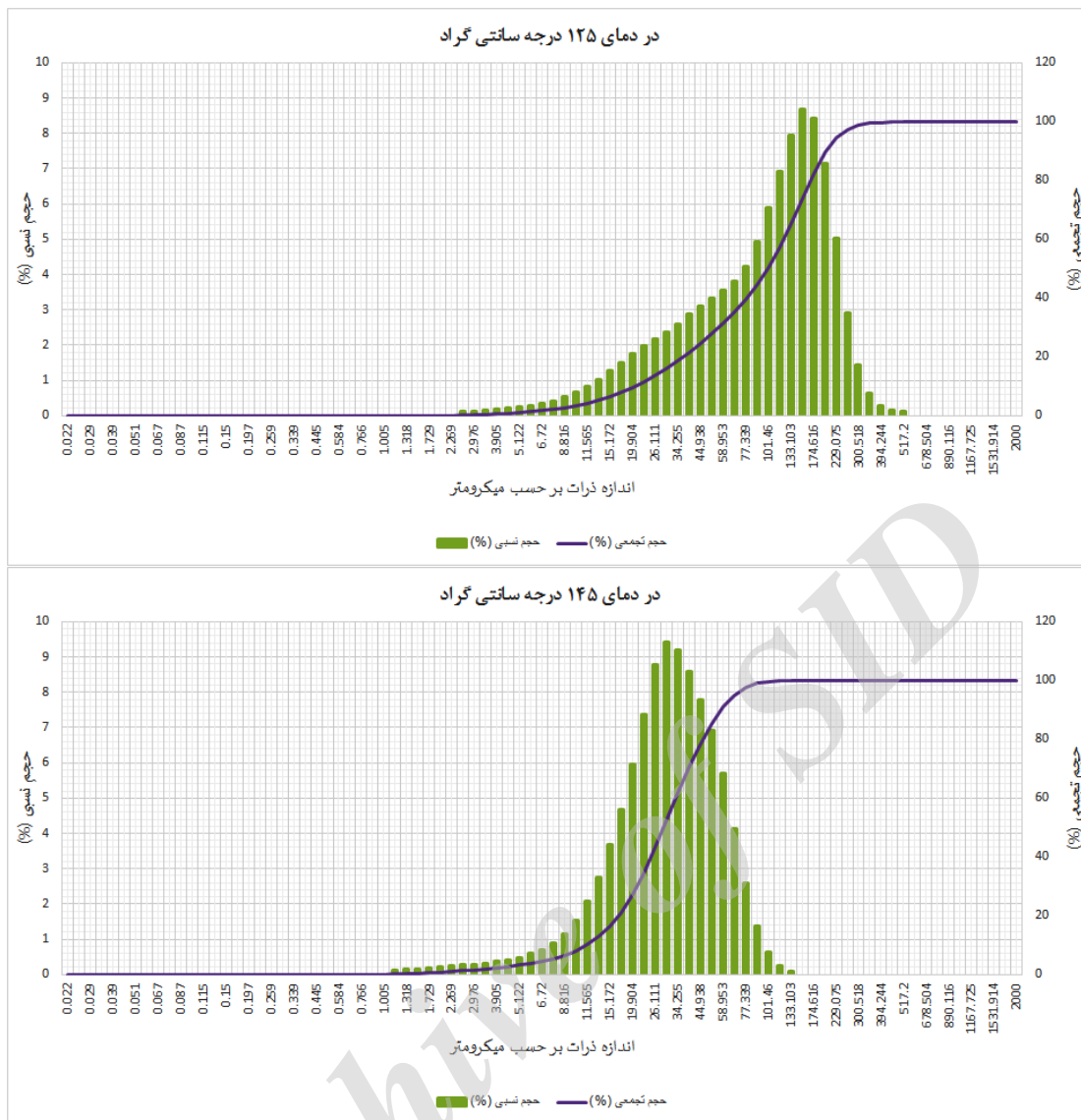
دما و کاهش ویسکوزیته ذراتی با ابعاد ۲۸ میکرومتری بیشترین فراوانی را دارند. بنابراین نتایج حاصل از آنالیزهای DLS و SLS در دو دما تایید کننده یکدیگرند.



شکل ۲-۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه SUN MIX در دمای ۱۴۵ درجه سانتی گراد.



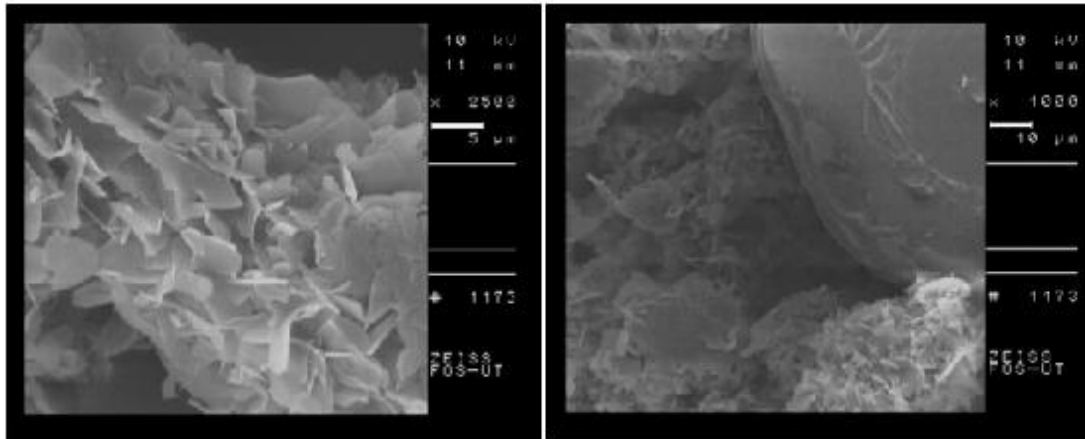
شکل ۲-۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه SUN MIX در دمای ۱۲۵ درجه سانتی گراد.



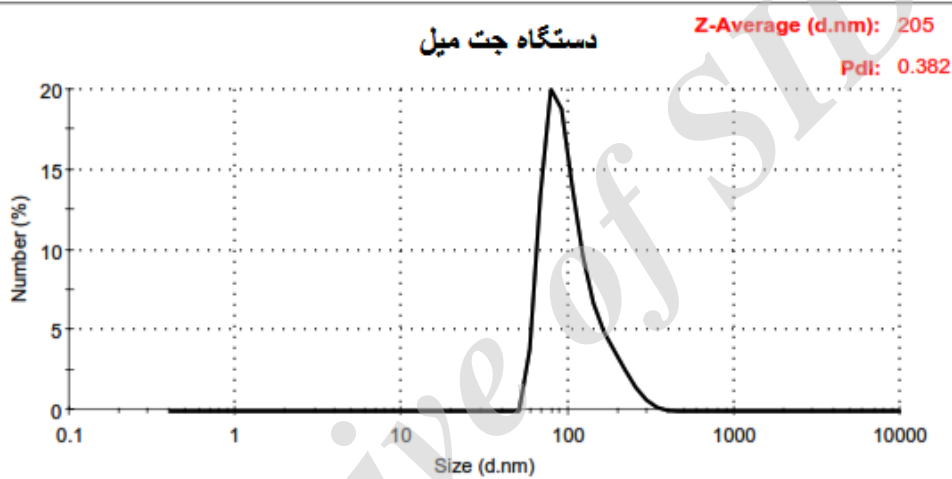
شکل ۲-۱۲-آنالیز SLS مربوط به SUN MIX در دو دمای ۱۲۵ و ۱۴۵ درجه سانتی گراد.

در شکل ۲-۱۳، ۲-۱۴ و ۲-۱۵ نیز نتایج آنالیز DLS، SEM و SLS مربوط به نمونه‌های از SUN MIX پودر شده توسط دستگاه جت میل نشان داده شده است. مطابق با نتایج ذراتی آگلومره شده با موفولوژی غیرکروی و ناهمگن را می‌توان مشاهده کرد. این نتایج می‌تواند تایید کننده کارایی بهتر

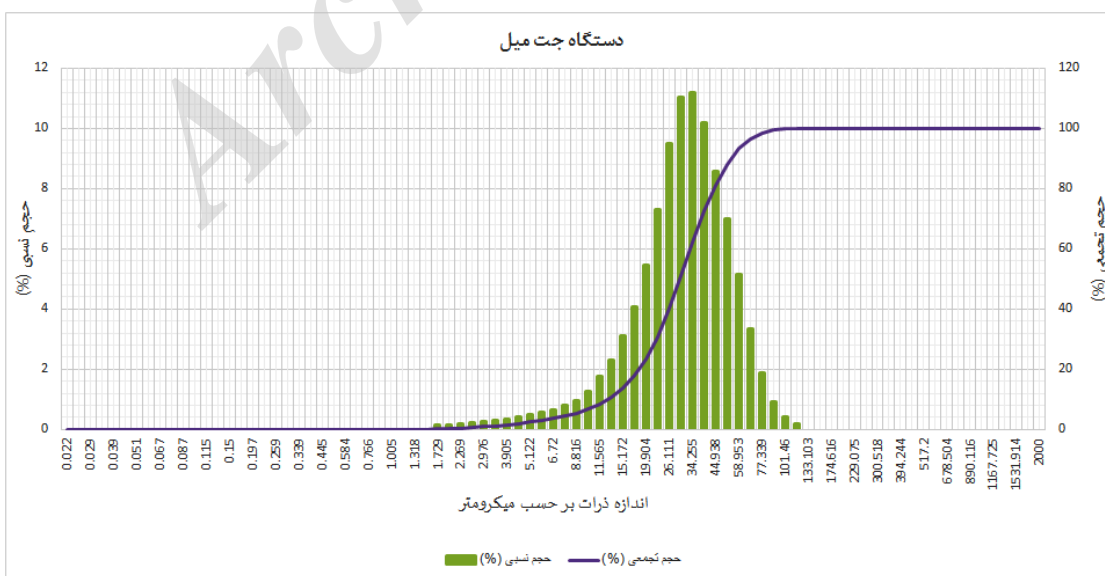
دستگاه پودر ساز طراحی شده باشد.



شکل ۲-۱۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه SUN MIX تولید شده با دستگاه جت میل.



شکل ۲-۱۴- آنالیز DLS مربوط به نمونه SUN MIX پودر شده توسط دستگاه جت میل.



شکل ۲-۱۵- آنالیز SLS مربوط به نمونه SUN MIX پودر شده توسط دستگاه جت میل.



## فصل سوم

### جمع بندی و نتیجه گیری

## جمع بندی:

در این طرح ساخت دستگاه تولید پودر میکرونیزه در فشار اتمسفری بعنوان یک روش جدید برای پودری شکل نمودن مواد آلی مذاب حساس به حرارت مورد بررسی قرار گرفت. ماده آلی مذاب ورودی می‌تواند به صورت خالص، با ذرات معلق پراکنده شده در آن و یا با مواد دیگر حل شده استفاده گردد. طراحی و ساخت دستگاه بر اساس محاسبات و نقشه های مهندسی بدست آمده انجام شد. بعد از بهینه کردن شرایط دستگاه از جهت طراحی نازل‌های مناسب و استفاده از سیستم خنک کننده در مخزن مذاب، پودر سازی سه نوع ترکیب آلی شامل یک اسید آلی (استتاریک اسید)، یک استر آلی (گلیسرین مونو استنارات (GMS)) و در نهایت مخلوطی از این اسید و استر آلی به همراه اجزای دیگر (SUN MIX) که از جمله محصولات تولیدی گروه فرآیندهای شیمیایی جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران نیز می‌باشد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی (SEM)، دستگاه پراکندگی نور دینامیکی (DLS) و پراکندگی استاتیک نور لیزر (SLS) در دماهای مختلف (که تاثیر مستقیمی بر روی ویسکوزیته ترکیبات مورد بحث دارد) مورد بررسی قرار گرفت و تشکیل پودرهای در مقیاس نانومتری و میکرومتری تایید شد. بر اساس مقایسه نتایج با پودرهای تولید شده با دو روش آسیاب کردن و استفاده از دستگاه جت میل می‌توان نتیجه گرفت که پودرهای تهیه شده با دستگاه پودر ساز از کیفیت بهتری برخوردارند. براساس نتایج حاصل از محاسبات طراحی و ساخت دستگاهی با این ابعاد می‌تواند پودرهایی تا قطر ۲۰۰ میکرومتر و با ظرفیت ۳۰۰ کیلوگرم بر ساعت را تولید کند. بدیهی است که دستگاه با اعمال شرایط عملیاتی مختلف از جمله



شدت جریان هوا، نوع و اندازه نازلها، شدت جریان سیال مذاب و دیگر پارامترها توانایی تولید پودرهایی با اندازه‌های کوچک‌تر و یا بزرگتر را نیز خواهد داشت.

Archive of SID

مراجع:

- [1] S.R.Percy, "Improvement in drying and concentrating liquid substances by atomising." US Patents 125, 406,1872.
- [2]C. Anandharamakrishnan, P .Ishwarya, "Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation," John Wiley Sons Ltd., New York, 2015.
- [3]K.Masters, "Spray Drying in Practice," Spray Dry Consult Intl, Denmark,pp. 1–35,2002.
- [4] J. Plateau, "Experimental and theoretical statics of liquids subject to molecular forces only," Gauthier-Villars, paris 1, pp. 4–13, 1873.
- [5] L. Rayleigh, "On the instability of jets," Proc.London. Math. Soc., vol. 10, no. 1, pp. 4–13,1878.
- [6] S. Vannueei, V. Marangon, "Spray engineering handbook,". [online] article review availableat [www.PNR-nozzles.com](http://www.PNR-nozzles.com)
- [7] K.Adibkia, M.Barzegar-Jalali, Y. Javadzadeh and H.Maheri-Esfanjani, "A review on the methods and applications of spray drying technology," Pharma. Sci., vol. 18, no. 2, pp. 119–132, 2012.
- [8] R. P. Patel, M. P. Patel and A. M. Suthar, "Spray drying technology: an overview," Indian J.Sci.Technol., vol. 2, no. 10, pp. 44–47, 2009.
- [9] C. Shizhu, Z. Najun, and Y. Zhimin, "Fluid kinetics principle and desing criteria of atomizer," Trans. Nonferrous. Met. Soc. China, vol. 6, no. 3, pp. 108–112, 1996.
- [10]K. Masters, "Spray Drying Handbook,"5th edition, Longman Scientific and Technical, Harlow, 1991.
- [11]A.Parihari,"Performance Study Of Spray Dryer Using Various Salt Solutions.," A thesis submitted to nationalInstitute of

technology, ROURKELA for the degree of master in technology in chemical engineering., 2009.

- [12] A. C. Hoffmann, L. E. Stein, "Gas cyclones and swirl tubes: Principle, Design and Operation.," Springer, 2nd edition, 2008.
- [13] J. Binder, J. Shutic, "Making informed choices – Understanding the role of cyclone separator efficiency for maximum overall system efficiency.," Nordson Corporation, 2008.
- [14] G.G. Nasr, A. J. Yule and L. Bendig, "Industrial Sprays and Atomization -Design, Analysis and Applications," Springer-Verlag London, 2002.
- [15] R. Rong, T. J. Naper-Munn, "Development of a More Efficient Classifying Cyclone.," Coal Preparation, vol. 23, pp. 149 – 165, 2003.
- [16] K. Elsayed, "Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies," Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the award of the degree of Doctor (Doctor in Engineering), 2011.
- [17] J.S. Lindeløv, M. Wahlberg, "Spray Drying for Processing of Nanomaterials," J. Phys. Conf. Ser, 170, 2009.
- [18] S.H. Lee, D. Heng, W.K. Ng, H.K. Chan, and R.B. Tan, "Nano spray drying: A novel method for preparing protein nanoparticles for protein therapy," Int. J. Pharm, vol. 403, pp. 192-200, 2011.
- [19] P. Hemmer, D. Mussatti, "Chapter 2: Wet Scrubbers for Particulate Matter," E.H. Pechan & Associates, Inc., 2002.
- [20] W.C. Lipp, "Practical Spray Technology: Fundamentals and Practice," ISBN 978-0-578-10090-6, 2012.



- [21] G. G. Nasr, A. J. Yule and L. Bending, “Industrial Sprays and Atomization,” Springer, ISBN 1-85233-611-0, 2002.
- [22] BETE Spray Dry Manual., BETE Fog Nozzle, Inc, [online] available at [http://www.bete.com/pdfs/BETE\\_SprayDryManual](http://www.bete.com/pdfs/BETE_SprayDryManual), 2005.
- [23] E. von Lavante, H. Kaya, F. Winzösch, S. Brinkhorst, B. Mickan, “Flow structure in critical flow Venturi nozzle and its effect on the flow rate,” *Flow. Meas. Instrum.*, vol. 44, pp. 97–106, 2015.
- [24] P. Watanawanyoo, H. Mochida, T. Furukawa, M. Nakamura, H. Hirahara, “Experimental Study on the Spray Characteristics of an Air Assisted Atomizer with Internal Mixing Chamber,” *Eur. J. Sci. Res.*, Vol. 84, no. 4, pp. 507-521, 2012.
- [25] A. H. Lefebvre, “Airblast atomization,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 6, pp. 233–2, 196, 1980.
- [26] H. Fukumoto, J. Aizawa and M. Takeda, “Liquid sprayer,” US Patent 7,086,617, 2006.
- [27] J. Anu Bhushani, C. Anandharamakrishnan, , “Electrospinning and electrospaying techniques: Potential foodbased applications,” *Trends, Food. Sci. Tech.*, vol. 38, no. 1, pp. 21–33, 2014.
- [28] B. P. Whelan, A. J. Robinson, “Nozzle geometry effects in liquid jet array impingement,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, pp. 2211-2221, 2009.
- [29] S. D. Heister, “Handbook of atomization and sprays-Chapter 27: Plain orifice spray nozzle,” Springer, pp. 625-645, 2010.
- [30] Z. Hua, “Numerical analysis of the 3-D flow field of pressurized atomizers with V-shaped cut at orifice.” *J. Hydrodyn.*, vol. 23, no. 2, pp. 187–192, 2011.

- [31] J. U. Bete, "Spray Nozzles," US Patent 2,804,341, 1956.
- [32] C. Qin, E. Loth, "Numerical description of a pressure-swirl nozzle spray," Chem. Eng. Prog., vol. 107, pp. 68–79, 2016.
- [33] C. Dumouchel, J. Cousin, K. Triballier, "On the role of the liquid flow characteristics on low-Weber-number atomization processes," Exp. Fluids., vol. 38, no. 5, pp. 637–647, 2005.
- [34] A. Lefebvre, "Atomization and Sprays," Hemisphere, 1989.
- [35] R. P. Fraser, P. Eisenklam, N. Dombrowski and D. Hasson, "Drop formation from rapidly moving sheets," AIChE. J., vol. 8, no. 3, pp. 672–680, 1963.
- [36] K. J. Wu, C. C. Su, R. L. Steinberger, D. A. Santavicca and F. V. Bracco, "Measurements of the Spray Angle of Atomizing Jets," J. Fluids. Eng., vol. 105, no. 4, pp. 406–413, 1983.
- [37] R. Grisso, P. Hipkins, S. D. Askew, L. Hipkins and D. McCall, "Nozzles: Selection and Sizing," University of Nebraska Lincoln Extension, Institute of Agricultural and Natural Resources, publication EC141, 2011; <http://www.ianrpubs.unl.edu/epublic/live/ec141/build/ec141>.
- [38] C. S. Handscomb, M. Kraft and A. E. Bayly, "A new model for the drying of droplets containing suspended solids," Chem. Eng. Sci., vol. 64, pp. 628–637, 2009.
- [39] R. Vehring, "Pharmaceutical particle engineering via spray drying," Pharma. Res., vol. 25, no. 5, pp. 999–1022, 2008.
- [40] L. Alamilla-Beltran, J. Canona-Perez, A. Jimenez-Aparicio and G. Gutierrez-Lopez, "Description of morphological changes of particles along spray drying," J. Food Eng., vol. 67, pp. 179–184,

2005.

- [41] R. Rajam, P. Karthik, S. Parthasarathi, G. S. Joseph and C. Anandharamakrishnan, "Effect of whey protein –alginate wall systems on survival of microencapsulated *Lactobacillus plantarum* in simulated gastrointestinal conditions," *J. Funct. Foods.*, vol. 4, no. 4, pp. 891–898, 2012.
- [42] P. N. Ezhilarasi, D. Indrani, B. S. Jena and C. Anandharamakrishnan, "Microencapsulation of *Garcinia fruit* extract by spray drying and its effect on bread quality," *J. Sci. Food Agr.*, vol. 94, pp. 1116–1123, 2013.
- [43] C. Van't Land, "Industrial crystallization of melts," CRC Press, 2004.
- [44] J. Smith, E. Stammers, L. Janssen, *Physical Transport Phenomena IN*, Delft University Press: Delft, Vol. 106, pp. 91-92, 1981.
- [45] N. Frossling, *Über die verdunstung fallender tropfen*, Beitr . Geophys. Gerlands, Vol. 52, pp. 170-216, 1938.
- [46] W. Boretzky, *Schmelzgranulierung-ein neues Verfahren zur Bildung fester Kügelchen mit definiertem Korn aus Schmelzen*, Eur. J. Lipid Sci. Technol. Vol. 69, pp. 263-268, 1967.
- [47] W. Faulkner, B. Shaw, "Efficiency and pressure drop of cyclones across a range of inlet velocities," *Applied engineering in agriculture*, Vol. 22, pp. 155-161, 2006.
- [48] N. Cheremisinoff, "Handbook of air pollution prevention and control," Butterworth-Heinemann, 2002
- [49] D. liu, B. liptak. "Environmental Engineers' Handbook," CRC Press LLC, second edition, 1999.
- [50] Theodore, Louis. "Air Pollution Control Equipment Calculations," John Wiley & Sons, 2008.
- [51] L. Wang, "Thoritical Study Of Cyclone Desing," Submitted to the Office



of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment  
of the requirements for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY.

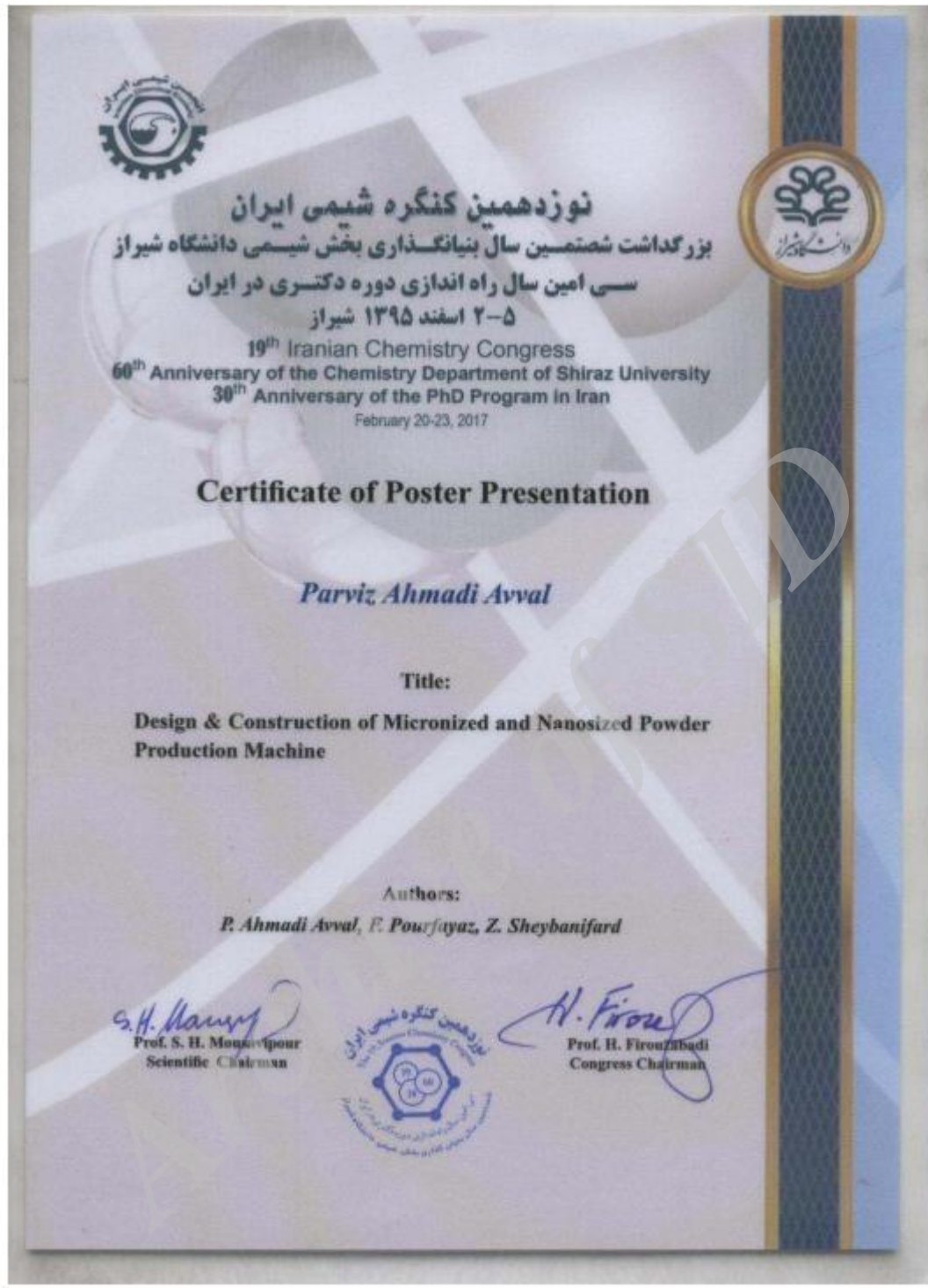
- [52] M. Taiwo, M. A. Namadi, J. B. Mokwa, “Design and analysis of cyclone dust separator,” American Journal of Engineering Research (AJER), Vol. 5, pp. 130-134, 2016.

Archive of SID



# ضمائم

Archive of SID





Archive of SID

## Abstract

In most cases, particle size reduction is required for using solid materials in chemical reactions and formulations. By using various grinding methods such as Ball mill, Cutting End Hummer, Pin mill, Roller mill and etc, grinding or reducing the size of solid particles is possible based on the nature of the materials and final size of particles.

Generally, grinding is along with the friction between the material and the crushing surface and therefore increasing temperature of the materials is inevitable. Hence, the grinding operation is not possible for some organic solids that have a low melting point. High temperature of these materials makes the paste and thus the operation can not be done. One of the ways to grind these materials is cooling solid particles to less than -30 degrees celsius before they enter into systems such as Hummer mill and Jet mill which cause a high costs for this operation.

Some of the organic materials in the Design of Chemical Processes Research Group have a melting point of 90 degrees celsius and to convert these material into micronized powder contain several steps that not only they cause time and money-consumption but also they cause so much dust and waste material.

At present study, financial supporting of ACECR headquarters, many papers, patents and a large number of catalogue of industrial companies and also research of some academic centers in the world were studied and investigated in order to collecte the preliminary data for entering to the operational phase of the present project.

**Keywords:** Micronized powder, grinding, heat sensitive materials, Solid particles





گروه پژوهشی طراحی  
فرآیندهای شیمیایی



ACECR  
Research and Technology  
Deputy



Islamic Republic of Iran

**Design and construction of micronized powder  
production machine for heat sensitive organic  
compounds (Ver. 2)  
(21-2439)**

**Tehran University Branch**

**Parviz Ahmadiavval**

**Designing of Chemical processes  
Research Group**

**October 2017**