

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - گرایش جداسازی

**عنوان:**

بررسی تجربی عملکرد نازل های دو سیاله

**توسط:**

سید هادی سیدین

**استاد راهنما:**

دکتر فرامرز هرمزی

**استاد مشاور:**

مهندس مسعود کمرانی

تیر ۱۳۹۰

## با سپاس فراوان از:

استاد گرامی، جناب آقای دکتر فرامرز هرمزی و آقای مهندس مسعود کمبرانی و همچنین آقای مهندس سید حسن الحسینی، که بدون راهنمایی ها و کمک های بی دریغ این بزرگواران، این تحقیق به سرانجام نمی رسید.

همچنین از دوست خوبم آقای حمید اسدی و همکاران محترم جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، که در انجام این تحقیق، همکاری کامل با اینجانب داشتند، کمال تشکر را دارم.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

## فهرست مطالب :

۱	فصل اول : مقدمه
۱	۱-۱ معرفی موضوع :
۲	۲-۱ تشریح پدیده تولید قطرات افشانه و کاربردهای آن :
۳	۳-۱ تقسیم بندی کلی افشانه ها بر مبنای تعداد سیال:
۳	۱-۳-۱ انواع افشانه های بادی :
۳	۴-۱ معرفی افشانه های دو سیاله :
۴	۱-۴-۱ افشانه های دو سیاله اختلاط داخلی :
۵	۲-۴-۱ افشانه های دو سیاله اختلاط خارجی :
۶	۵-۱ انواع الگوهای پاشش در افشانه های دو سیاله و کاربرد آنها :
۸	۶-۱ قطر میانگین ساتر و قطر میانگین :
۱۰	۷-۱ معرفی شاخص های ALR, GLR و انواع رژیم جریان در افشانه ها :
۱۱	۸-۱ اهمیت بررسی عملکرد افشانه های دو سیاله :
۱۱	۹-۱ تحقیق پیش رو :
۱۳	فصل دوم : مبانی نظری افشانه های دو سیاله
۱۳	۱-۲ اصول افشان شدن در افشانه های دو سیاله و ایجاد قطرات :
۱۵	۲-۲ ضریب تخلیه در افشانه های دو سیاله :
۱۷	۳-۲ تشکیل ورقه مایع و شکست آن:
۱۸	۱-۳-۲ شکست جت مایع در جریان آرام:
۱۹	۲-۳-۲ شکست جت مایع در جریان آشفته:
۱۹	۳-۳-۲ فرآیند شکست جت مایع توسط جریان گاز:
۱۹	۴-۲ بررسی عوامل موثر بر اندازه متوسط قطرات:
۲۷	۵-۲ استفاده از آنالیز ابعادی برای تعیین تابعیت متغیرها :
۲۹	۶-۲ روش های تعیین مشخصات افشانه های دو سیاله :
۳۰	۱-۶-۲ روش شبیه سازی CFD :
۳۰	۲-۶-۲ روش عکسبرداری و پردازش تصویر:

۳۰	۳-۶-۲ روش اندازه گیری لیزر:
۳۱	۴-۶-۲ روش سنجش حجمی نیمرخ پاشش قطرات افشانه:
۳۲	۵-۶-۲ روش PIV :
۳۲	۶-۶-۲ روش مدلسازی :
۳۲	۷-۶-۲ سایر روش های شناسایی خواص افشانه های دو سیاله :
۳۳	فصل سوم : مروری بر کارهای تجربی گذشته
۳۳	۳-۱ تاریخچه آماری و موضوعی مقالات مهم ارائه شده :
۳۴	۳-۲ بعضی از کارهای مهم انجام شده در زمینه افشانه های دو سیاله تاکنون :
۳۹	۳-۳ دلایل استفاده از روش عکسبرداری :
۴۰	۳-۴ اهداف تحقیق :
۴۱	فصل چهارم : معرفی روش تجربی و شرح دستگاه آزمایشگاهی
۴۱	۴-۱ معرفی روش تجربی بررسی خواص افشانه ها :
۴۱	۴-۲ معرفی افشانه های مورد بررسی :
۴۱	۴-۳ محدوده کاری و عامل های مورد مطالعه :
۴۲	۴-۴ تعریف طرح آزمایش (DOE) و انواع روش های آن:
۴۳	۴-۴-۱ هدف از طرح آزمایش و کاربردهای آن :
۴۳	۴-۴-۲ مراحل طرح یک آزمایش ساده :
۴۳	۴-۴-۳ استفاده از نرم افزارهای آماری برای طراحی آزمایش :
۴۴	۴-۴-۵ آزمایش های طرح شده برای تحقیق حاضر :
۴۴	۴-۴-۱-۵ طرح آزمایش بررسی الگوی نیمرخ پاشش قطرات در افشانه های ۱ و ۲ به روش تاگوچی:
۴۵	۴-۴-۶ تشریح روش عکسبرداری :
۴۵	۴-۴-۱-۶ چگونگی عکسبرداری از پاشش افشان:
۴۶	۴-۴-۷ مراحل آماده سازی تصاویر :
۴۷	۴-۴-۱-۷ بررسی تصاویر و بدست آوردن اطلاعات لازم.
۴۷	۴-۴-۸ نحوه استخراج تصاویر و محاسبه سرعت متوسط قطرات:
۴۹	۴-۴-۹ مقدمات مورد نیاز برای محاسبه اندازه متوسط قطرات:
۵۰	۴-۴-۱-۹ فراخوانی، نمایش و ذخیره سازی تصویر :

۵۰	۲-۹-۴ استفاده از روش های اصلاح تصویر برای تفکیک و وضوح بهتر:
۵۰	۳-۹-۴ تشریح لبه و حفره در تصاویر دیجیتال:
۵۱	۴-۹-۴ توضیح روش سوپل :
۵۲	۴-۱۰ تشریح فرآیند پردازش تصویر برای محاسبه اندازه متوسط قطرات :
۵۳	۴-۱۰-۱ چگونگی محاسبه اندازه متوسط قطرات:
۵۴	۴-۱۰-۲ بررسی شکل قطرات خروجی از افشانه برای محاسبه اندازه قطرات:
۵۵	۴-۱۰-۳ محاسبه قطر قطرات:
۵۶	۴-۱۰-۴ عملیات قبل از پردازش تصویر :
۵۶	۴-۱۰-۵ تغییر مقیاس :
۵۷	۴-۱۱ بررسی دقت اندازه گیری روش پردازش تصویر :
۶۱	۴-۱۲ مشخصات دستگاه ها و تجهیزات آزمایشگاهی :
۶۱	۴-۱۲-۱ معرفی دستگاه شماره ۱:
۶۲	۴-۱۲-۲ معرفی دستگاه شماره ۲:
۶۲	۴-۱۳ معرفی افشانه های دو سیاله مورد آزمایش:
۶۲	۴-۱۳-۱ افشانه شماره ۱ (N1) :
۶۴	۴-۱۳-۲ افشانه شماره ۲ (N2):
۶۸	۴-۱۳-۳ فشار سنج روغنی و حلقه رطوبت گیر افشانه شماره ۲:
۶۸	۴-۱۳-۴ افشانه شماره ۳ (N3) :
۶۹	۴-۱۴ بخش اتصالات و مخزن تحت فشار مایع :
۷۰	۴-۱۴-۱ مخزن های تحت فشار مایع:
۷۰	۴-۱۵ طراحی ظروف جمع کننده مایع برای توزیع دبی حجمی افشان مایع:
۷۱	۴-۱۵-۱ مشکلات ساخت ظروف جمع کننده مایع:
۷۳	۴-۱۶ معرفی ابزارهای سنجش حجمی مقدار مایع و روتامترها:
۷۶	۴-۱۷ معرفی دوربین های دیجیتال مورد استفاده:
۷۸	فصل پنجم : نتایج و بحث
۷۸	۵-۱ بحث و بررسی نتایج آزمایش ها :
۷۸	۵-۱-۱ توزیع نیمرخ پاشش افشان برای افشانه شماره ۱ (N1):
۸۱	۵-۱-۲ توزیع نیمرخ پاشش افشان برای افشانه شماره ۲ (N2):

- ۸۵ ۳-۱-۵ توزیع نیمرخ پاشش افشان برای افشانه شماره ۳ (N3):
- ۸۶ ۲-۵ خلاصه نتایج آزمایش های توزیع نیمرخ پاشش قطرات :
- ۸۷ ۳-۵ آنالیز تاگوچی و ANOVA متوسط برای آزمایش های پروفایل پاشش قطرات:
- ۸۹ ۴-۵ اندازه گیری و تغییر زاویه پاشش افشان بر حسب دبی و فشار هوا:
- ۹۲ ۵-۵ شکل گیری و تکمیل مخروط پاشش افشان، بر حسب زمان.
- ۹۳ ۶-۵ مقایسه نتایج عکسبرداری افشانه شماره ۲ با نتایج روش لیزر و شبیه سازی CFD:
- ۹۴ ۱-۶-۵ مقایسه نتایج سرعت متوسط قطرات افشانه شماره ۲ با روش لیزر و شبیه سازی CFD :
- ۹۶ ۲-۶-۵ بررسی نتایج متوسط سرعت قطرات در افشانه شماره ۲ :
- ۹۷ ۷-۵ محاسبات مربوط به قطر میانگین و ساتر قطرات:
- ۹۷ ۱-۷-۵ محاسبه قطر میانگین ساتر و مقایسه آن با قطر میانگین در افشانه شماره ۲:
- ۱۰۰ ۲-۷-۵ مقایسه قطر میانگین و ساتر قطرات در افشانه شماره ۳:
- ۱۰۱ ۳-۷-۵ مقایسه توزیع میانگین اندازه قطرات با روش لیزر و شبیه سازی CFD در افشانه شماره ۲:
- ۱۰۳ ۴-۷-۵ بررسی نتایج متوسط اندازه قطرات در افشانه شماره ۲ :
- ۱۰۳ ۵-۸ نحوه توزیع عدد چگالی در فواصل مختلف از سر افشانه شماره ۲ :
- ۱۰۵ ۹-۵ بررسی روابط نظری مورد استفاده در افشانه های دو سیاله :
- ۱۰۶ ۱۰-۵ مقایسه روش های مختلف بررسی عملکرد افشانه ها در این تحقیق:
- ۱۰۷ ۵-۱۱ ارائه رابطه ای برای تعیین زاویه پاشش افشان:
- ۱۰۸ نتیجه گیری :
- ۱۰۹ پیشنهاد:
- ۱۱۰ منابع و مراجع:
- ۱۱۲ پیوست ها :
- ۱۱۲ پیوست الف : تشریح مختصر روش تاگوچی و آنالیز Anova :
- ۱۱۶ پیوست ب : کد اصلاح و آماده سازی تصاویر، برای پردازش با روش های Granulometry.
- ۱۱۷ پیوست ج : کد محاسبه متوسط قطر، تعداد و درصد قطرات، پس از آماده سازی تصویر .
- ۱۱۹ پیوست د : کد محاسبه قطر میانگین Sauter و تعداد و درصد قطرات.



## فهرست شکل ها :

- شکل ۱-۱: تصویری از شکست اولیه و ثانویه فیلم مایع به قطرات. ۲
- شکل ۲-۱: افشانه های دو سیاله = سمت چپ: اختلاط خارجی ساده و سمت راست: اختلاط داخلی ساده. ۴
- شکل ۳-۱: طرح های مختلف از افشانه دو سیاله با اختلاط داخلی. ۵
- شکل ۴-۱: افشانه دو سیاله اختلاط خارجی (a) طراحی ساده (b) افشانه با چرخش در مسیر جریان. ۶
- شکل ۵-۱: الگوهای عمومی پاشش در افشانه ها - تصویر از روبرو. ۶
- شکل ۶-۱: پوشش نواری و گسترده در افشانه ها. ۶
- شکل ۷-۱: الگوهای پاشش افشانه تصویر از بالا. ۷
- شکل ۱-۲: تصویری از فرآیند افشان کردن. ۱۳
- شکل ۲-۲: افشانه دو سیاله اختلاط خارجی - دارای طول اختلاط  $L_{mix}$  از گاز و مایع ۱۴
- شکل ۳-۲: تاثیر فشار روی ضریب تخلیه در افشانه ها. ۱۷
- شکل ۴-۲: تغییرات  $d_{32}$  با ویسکوزیته مایع، برای افشانه اختلاط خارجی در سرعت های مختلف هوای افشان مشخصات:  $T=296\text{ K}, P=1\text{ bar}, \dot{m}_{Liq} = 15\text{ g/s}, \gamma_{Liq} = 0.072\text{ kg/s}^2, \rho_{Liq} = 995\text{ kg/m}^3$ . ۲۱
- شکل ۵-۲: تغییرات  $d_{32}$  با کشش سطحی مایع، افشانه اختلاط خارجی در دبی های جرمی مختلف مایع. مشخصات:  $T=296\text{ K}, P=1\text{ bar}, \gamma_{Liq} = 0.072\text{ kg/s}^2, \eta_{Liq} = 1.2\text{ mPas}, \rho_{Liq} = 995\text{ kg/m}^3$ . ۲۱
- شکل ۶-۲: تغییرات  $d_{32}$  با چگالی مایع، برای یک افشانه اختلاط خارجی در سرعت های مختلف هوای افشان کننده. مشخصات جریان:  $T=296\text{ K}, P=1\text{ bar}, \dot{m}_{Liq} = 15\text{ g/s}, \gamma_{Liq} = 0.072\text{ kg/s}^2$ . ۲۲
- شکل ۷-۲: تغییرات  $d_{32}$  با دمای هوای افشان کننده در افشانه اختلاط خارجی با سرعت های مختلف هوا. مشخصات:  $P=1\text{ bar}, \gamma_{Liq} = 0.072\text{ kg/s}^2, \eta_{Liq} = 1.2\text{ mPas}, \rho_{Liq} = 995\text{ kg/m}^3$ . ۲۳
- شکل ۸-۲: تغییرات  $d_{32}$  با فشار هوای افشان کننده برای افشانه اختلاط خارجی در دبی های جرمی متفاوت مایع. مشخصات:  $T=296\text{ K}, \gamma_{Liq} = 0.072\text{ kg/s}^2, \eta_{Liq} = 1.2\text{ mPas}, \rho_{Liq} = 995\text{ kg/m}^3$ . ۲۳
- شکل ۹-۲: تغییرات  $d_{32}$  با نسبت به ALR، برای یک افشانه اختلاط خارجی در سرعت های مختلف هوا مشخصات جریان:  $T=296\text{ K}, P=1\text{ bar}, v_{Air} = \eta_{Liq} = 1.2\text{ mPas}, \rho_{Liq} = 995\text{ kg/m}^3$ . ۲۴
- شکل ۱۰-۲: مقایسه SMD برای مقادیر متفاوت عدد وبر گاز  $(We_{Gas})$ ، برای چهار رابطه ارائه شده افشانه های اختلاط خارجی. داده ها برای  $Oh = 0.003$  و  $1/ALR=0.3$  بدست آمده اند. ۲۴
- شکل ۱۱-۲: متوسط قطر قطره پیشبینی شده ساتر برای مقادیر متفاوت از عدد وبر گاز  $(We_{Gas})$  در روابط افشانه های اختلاط خارجی Prefilm. داده ها برای  $Oh = 0.003$  و  $1/ALR=0.3$  بدست آمده اند. ۲۵
- شکل ۱۲-۲: افزایش زاویه پاشش با فشار هوا در افشانه بادی فشاری - چرخشی. ۲۵
- شکل ۱۳-۲: تصاویری از افزایش زاویه پاشش با افزایش فشار هوا در افشانه فشاری - چرخشی. ۲۶
- شکل ۱۴-۲: تصویری از روش عکسبرداری. ۳۰

- شکل ۲-۱۵: شکل شماتیک دستگاه تجربی لیزر بررسی پاشش افشانه در پژوهشگاه صنعت نفت. ۳۱
- شکل ۲-۱۶: تصویری از روش جمع آوری حجمی قطرات برای تعیین نیمرخ پاشش افشانه. ۳۱
- شکل ۳-۱: نمودار تاریخچه آماری مقالات مهم از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۱ میلادی. ۳۳
- شکل ۳-۲: بررسی موضوعی کارهای انجام شده بر حسب درصد. ۳۳
- شکل ۴-۱: استفاده از دوربین دیجیتال برای فیلمبرداری حالت افشان شدن مایع. ۴۵
- شکل ۴-۲: موقعیت های مختلف قرارگیری منبع نور، برای عکسبرداری بهتر. ۴۶
- شکل ۴-۳: آستانه درخشندگی مناسب از چپ به راست. ۴۷
- شکل ۴-۴: مقادیر عددی داده شده برای هر پیکسل رنگی شامل قرمز، سبز و آبی است. ۴۷
- شکل ۴-۵: بدست آوردن مقدار جابجایی قطرات بر حسب پیکسل، ۴۸
- شکل ۴-۶: وجود نوسان در توده افشان در سر افشانه و تغییرات سرعت. ۴۸
- شکل ۴-۷: تغییر جابجایی قطره بر حسب پیکسل در دو فریم فیلمبرداری شده با سرعت ۱۲۰۰ فریم بر ثانیه، توسط دوربین کاسیو در کنار شاخص 1 cm و تعیین طول بر حسب پیکسل با نرم افزار Matlab. ۴۹
- شکل ۴-۸: نواحی ۰ و ۱ در تصویر دو بعدی برای ناحیه قطره بر حسب پیکسل در Matlab. ۵۰
- شکل ۴-۹: تصویری برای توصیف لبه و حفره در اشیاء. ۵۱
- شکل ۴-۱۰: تصویر سیاه و سفید با فرمت bmp افشان نیتروژن - روش Morphological با Matlab. [۲۱] ۵۲
- شکل ۴-۱۱: تبدیل تصویر اصلی به سیاه و سفید با آستانه درخشندگی مناسب. ۵۲
- شکل ۴-۱۲: تصاویری از روش های Granulometry برای آماده سازی تصویر ویژه ذرات ریز. ۵۲
- شکل ۴-۱۳: نحوه اتصال پیکسل ها - (۱): اتصال ۴ تایی. (۲): اتصال ۸ تایی. ۵۳
- شکل ۴-۱۴: استفاده از روش اصلاح تصویر سو بل جهت تفکیک بهتر قطرات افشانه. ۵۴
- شکل ۴-۱۵: محاسبه قطر قطره بر مبنای کروی بودن قطرات. ۵۵
- شکل ۴-۱۶: فرض شکل قطره بین دایره و دیسک جمع شده (بیضی) توسط Malot و Blaisot. ۵۵
- شکل ۴-۱۷: فرض بیضی گون قطره در اثر نیروی آیرودینامیکی توصیف شده توسط مدل ETAB. ۵۵
- شکل ۴-۱۸: معادل قرار دادن سطح هر قطره، به طور تقریبی برابر با بیضی [۱۹]. ۵۶
- شکل ۴-۱۹: تعداد پیکسل های معادل یک سانتیمتر در تصویر عکسبرداری شده با دوربین دیجیتال. ۵۶
- شکل ۴-۲۰: روند نمای پردازش تصویر. ۵۷
- شکل ۴-۲۱: غربال سازی ذرات نمک در ابعاد مورد نظر. ۵۷
- شکل ۴-۲۲: تصویری از میکروسکوپ الکترونیکی در دانشکده فنی دانشگاه تهران. ۵۸
- شکل ۴-۲۳: تصویر بزرگنمایی شده ۱۲۵ برابری و اندازه گذاری شده ذرات زیر میکروسکوپ. ۵۸
- شکل ۴-۲۴: ابعاد ذره نمک نمونه توسط نرم افزار میکروسکوپ الکترونیکی - مقیاس ۱۲۵ برابر. ۵۹
- شکل ۴-۲۵: تعداد پیکسل های معادل یک سانتیمتر توسط نرم افزار Matlab. ۵۹
- شکل ۴-۲۶: تبدیل تصویر به حالت سیاه و سفید و انتخاب آستانه درخشندگی مناسب. ۵۹

- شکل ۴-۲۷: تصویری از شکسته شدن فیلم مایع در افشانه شماره ۲. ۶۰
- شکل ۴-۲۸: دستگاه شماره (۱). ۶۱
- شکل ۴-۲۹: تصویر دستگاه بستر سیال. ۶۲
- شکل ۴-۳۰: تصویر شماتیک از بخش های مختلف افشانه شماره ۱. ۶۳
- شکل ۴-۳۱: تصویری از حرکت سوزن در افشانه تفنگی به سمت عقب و افشان شدن مایع. ۶۳
- شکل ۴-۳۲: افشانه شماره ۱ خریداری شده از بازار. ۶۳
- شکل ۴-۳۳: تصویر شماتیک افشانه FCC ساخته شده شماره ۲. ۶۴
- شکل ۴-۳۴: نقشه صنعتی کل افشانه شماره ۲ - تصویر از روبرو. ۶۵
- شکل ۴-۳۵: نقشه طراحی شده اجزای متصل کننده بخش ماریپیچ و بدنه اصلی افشانه شماره ۲. ۶۶
- شکل ۴-۳۶: طراحی لوله های عبور جریان افشانه شماره ۲. ۶۶
- شکل ۴-۳۷: نقشه صنعتی کلاهک سر افشانه شماره ۲. ۶۷
- شکل ۴-۳۸: تصاویری از کلاهک و لوله ماریپیچ افشانه شماره ۲. ۶۷
- شکل ۴-۳۹: (۱) - لوله سوراخ دار توزیع کننده مایع، (۲) - لوله هوا و ۲ مهره اتصال. ۶۷
- شکل ۴-۴۰: تصویر کامل افشانه شماره ۲ ساخته شده از جنس برنج. ۶۸
- شکل ۴-۴۱: نقشه صنعتی افشانه شماره ۳ - تصویر از بالا و کنار. ۶۹
- شکل ۴-۴۲: تصاویر بخش های مختلف از افشانه شماره ۳. ۶۹
- شکل ۴-۴۳: مخزن های تحت فشار مایع. ۷۰
- شکل ۴-۴۴: نقشه ظرف جمع کننده مایع پلکسی. ۷۱
- شکل ۴-۴۵: تصویری از ظرف جمع کننده مایع پلکسی با دو نمای متفاوت. ۷۱
- شکل ۴-۴۶: نقشه صنعتی ظرف جمع کننده مایع فلزی. ۷۲
- شکل ۴-۴۷: تصاویری از نماهای مختلف ظرف فلزی جمع کننده مایع و مراحل مختلف ساخت. ۷۲
- شکل ۴-۴۸: وسایل سنجش حجم مایع. ۷۳
- شکل ۴-۴۹: تصویری از روتامترها در دو سیستم. ۷۳
- شکل ۴-۵۰: کمپرسور بزرگ هوا با مخزن ۱۰۰ لیتری. ۷۴
- شکل ۴-۵۱: استفاده از لامپ مدادی هزار واتی برای نور پردازی. ۷۴
- شکل ۴-۵۲: تصویری از آزمایش افشانه ها - (۱) بازوی نگه دارنده. (۲) محل قرارگیری افشانه. ۷۴
- شکل ۴-۵۳: تصاویری از پاشش افشانه شماره ۱ - نمای دور و نزدیک. ۷۵
- شکل ۴-۵۴: تصاویری از پاشش افشانه شماره ۲ - نمای دور و نزدیک. ۷۵
- شکل ۴-۵۵: تصاویری از پاشش افشانه شماره ۳ - نمای دور و نزدیک. ۷۵
- شکل ۴-۵۶: تصویری از سه دوربین استفاده شده در این تحقیق. ۷۶
- شکل ۴-۵۷: تصویر شماتیک از اتصال دستگاه های مختلف برای آزمایش. ۷۷

- شکل ۵-۱: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش اول در ارتفاع ۵ cm برای افشانه شماره ۱. ۷۸
- شکل ۵-۲: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش دوم در ارتفاع ۸ cm برای افشانه شماره ۱. ۷۹
- شکل ۵-۳: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش سوم در ارتفاع ۱۱ cm برای افشانه شماره ۱. ۸۰
- شکل ۵-۴: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش چهارم در ارتفاع ۱۴ cm برای افشانه شماره ۱. ۸۰
- شکل ۵-۵: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش پنجم در ارتفاع ۱۷ cm برای افشانه شماره ۱. ۸۱
- شکل ۵-۶: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش ششم در ارتفاع ۲۰ cm برای افشانه شماره ۱. ۸۱
- شکل ۵-۷: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش اول در ارتفاع ۵ cm برای افشانه شماره ۲. ۸۲
- شکل ۵-۸: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش دوم در ارتفاع ۸ cm برای افشانه شماره ۲. ۸۳
- شکل ۵-۹: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش سوم در ارتفاع ۱۴ cm برای افشانه شماره ۲. ۸۳
- شکل ۵-۱۰: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش چهارم در ارتفاع ۲۰ cm برای افشانه شماره ۲. ۸۴
- شکل ۵-۱۱: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش پنجم در ارتفاع ۲۵ cm برای افشانه شماره ۲. ۸۴
- شکل ۵-۱۲: توزیع نیمرخ پاشش برای سه آزمایش ششم در ارتفاع ۳۰ cm برای افشانه شماره ۲. ۸۵
- شکل ۵-۱۳: مقایسه نیمرخ پاشش افشان در سه ارتفاع ۱۴، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتری در افشانه شماره ۳. ۸۶
- شکل ۵-۱۴: نمودار تعداد تقریبی استوانه پر شده بر حسب ارتفاع افشانه ۱. ۸۷
- شکل ۵-۱۵: نمودار تعداد تقریبی استوانه پر شده بر حسب ارتفاع افشانه ۲. ۸۷
- شکل ۵-۱۶: آنالیز تاگوچی پروفایل پاشش قطرات افشانه شماره (۱)، A ارتفاع، B دبی هوا و C دبی مایع. ۸۸
- شکل ۵-۱۷: آنالیز تاگوچی پروفایل پاشش قطرات افشانه شماره (۲)، A ارتفاع، B دبی هوا و C دبی مایع. ۸۸
- شکل ۵-۱۸: آنالیز ANOVA متوسط برای پروفایل پاشش قطرات افشانه شماره ۱. ۸۹
- شکل ۵-۱۹: آنالیز ANOVA متوسط برای پروفایل پاشش قطرات افشانه شماره ۲. ۸۹
- شکل ۵-۲۰: تعیین زاویه پاشش در افشانه ها - محاسبه تعداد پیکسل ها توسط Matlab. ۹۰
- شکل ۵-۲۱: افزایش زاویه پاشش افشانه شماره ۱ با افزایش دبی حجمی هوا. ۹۱
- شکل ۵-۲۲: افزایش زاویه پاشش افشانه شماره ۲ بر حسب فشار هوا. ۹۱
- شکل ۵-۲۳: افزایش تدریجی زاویه افشانه شماره ۱ با افزایش دبی حجمی هوا (L/min). ۹۲
- شکل ۵-۲۴: افزایش تدریجی زاویه افشان افشانه شماره ۲ با فشار مخلوط (bar). ۹۲
- شکل ۵-۲۵: تشکیل مخروط پاشش بر حسب زمان برای افشانه شماره ۱. ۹۲
- شکل ۵-۲۶: تشکیل مخروط پاشش بر حسب زمان برای افشانه شماره ۲. ۹۳
- شکل ۵-۲۷: توزیع سرعت متوسط قطرات در مختصات شعاعی در فاصله ۸ cm از سر افشانه شماره ۲. ۹۴
- شکل ۵-۲۸: توزیع سرعت متوسط قطرات در مختصات شعاعی در فاصله ۱۴ cm از سر افشانه شماره ۲. ۹۴
- شکل ۵-۲۹: توزیع سرعت متوسط قطرات در مختصات شعاعی در فاصله ۲۰ cm از سر افشانه شماره ۲. ۹۵
- شکل ۵-۳۰: تغییرات میانگین متوسط سرعت قطرات با فاصله از سر افشانه شماره ۲. ۹۶
- شکل ۵-۳۱: مقایسه تغییرات قطر میانگین و ساتر قطرات در فاصله ۸ cm از سر افشانه شماره ۲. ۹۸

- ۹۸ شکل ۵-۳۲: مقایسه تغییرات قطر میانگین و ساتر قطرات در فاصله ۱۴ cm از سر افشانه شماره ۲.
- ۹۹ شکل ۵-۳۳: مقایسه تغییرات قطر میانگین و ساتر قطرات در فاصله ۲۰ cm از سر افشانه شماره ۲.
- ۹۹ شکل ۵-۳۴: مقایسه تغییرات قطر میانگین و ساتر در فواصل مختلف از سر افشانه شماره ۲.
- ۱۰۰ شکل ۵-۳۵: نمودار توزیع کل اندازه قطرات در افشانه شماره ۳.
- ۱۰۱ شکل ۵-۳۶: توزیع اندازه متوسط قطره در فاصله شعاعی و ارتفاع ۸ cm از سر افشانه شماره ۲.
- ۱۰۱ شکل ۵-۳۷: توزیع اندازه متوسط قطرات در مختصات شعاعی در فاصله ۱۴ cm از سر افشانه شماره ۲.
- ۱۰۲ شکل ۵-۳۸: توزیع اندازه متوسط قطرات در مختصات شعاعی در فاصله ۲۰ cm از سر افشانه شماره ۲.
- ۱۰۴ شکل ۵-۳۹: توزیع شعاعی عدد چگالی در روش عکسبرداری در فواصل معین از سر افشانه شماره ۲.
- ۱۰۴ شکل ۵-۴۰: توزیع شعاعی عدد چگالی با شبیه سازی CFD در فواصل معین از سر افشانه شماره ۲.
- ۱۰۵ شکل ۵-۴۱: توزیع ابعاد پاشش در رابطه با عدد چگالی در افشانه شماره ۲.
- ۱۱۲ شکل الف-۱: تابع زیان- کیفیت تاگوچی.
- ۱۱۳ شکل الف-۲: گراف متغیرها و سطوح تاگوچی L16.
- ۱۱۴ شکل الف-۳: الگوریتم تحلیلی تاگوچی.

## فهرست جداول:

- جدول ۱-۱: قطرهای میانگین مختلف ذرات ارائه شده توسط لیبور و کاربردهای متفاوت آن ها. ۱۰
- جدول ۱-۲: سرعت افشان شدن و ضریب تخلیه برای سه افشانه مختلف. ۱۷
- جدول ۱-۳: شرح مختصری از کارهای مهم انجام شده در زمینه افشانه های دو سیاله در گذشته. ۳۷
- جدول ۱-۴: آزمایش های طرح شده برای دو افشانه ۱ و ۲ توسط روش تاگوچی. ۴۵
- جدول ۲-۴: ابعاد قسمت های مختلف مربوط به افشانه شماره ۲. ۶۵
- جدول ۱-۵: شرایط انجام آزمایش برای محاسبه متوسط سرعت و اندازه قطرات در افشانه شماره ۲. ۹۳
- جدول ۲-۵: مقدار متوسط سرعت قطرات در فواصل مختلف از خروجی افشانه شماره ۲. ۹۶
- جدول ۳-۵: مقایسه میزان خطای نسبی، سرعت قطرات در هر سه روش در افشانه شماره ۲. ۹۶
- جدول ۴-۵: مقایسه میانگین قطرهای متوسط و ساتر قطرات در افشانه شماره ۲. ۹۹
- جدول ۵-۵: مقدار متوسط اندازه قطر قطرات در فواصل مختلف از خروجی افشانه شماره ۲. ۱۰۲
- جدول ۶-۵: مقایسه میزان خطای نسبی اندازه متوسط قطرات در هر سه روش در افشانه شماره ۲. ۱۰۲
- جدول ۷-۵: شرایط عملیاتی تجربی مورد استفاده در آزمایش ها برای افشانه شماره ۲. ۱۰۵
- جدول ۸-۵: مقایسه روش های مختلف بررسی عملکرد افشانه ها. ۱۰۶
- جدول الف-۱: تعیین آرایه های تاگوچی. ۱۱۳

فهرست علائم و اختصارات :

عبارت	علامت	عبارت	علامت
دبی حجمی	$Q (m^3/s)$	قطر کوچک بیضی	a
عدد بدون بعد اوهنسورژ	Oh	مساحت روزنه افشانه	$A_0 (m^2)$
عدد بدون بعد رینولدز	Re	سطح قطره	$A (m^2)$
قطر میانگین ساتر قطرات	SMD (m)	سطح مقطع جت گاز	$A_G (m^2)$
زمان	t (s)	سطح ذره کروی	$A_p (m^2)$
دبی حجمی هوای افشان کننده	$U_{at} (m^3/s)$	نسبت دبی جرمی هوا به آب	ALR
سرعت مایع	$u_L (m/s)$	سطح مقطع اختلاط	$A_{SS} (m^2)$
سرعت گاز	$u_G (m/s)$	قطر بزرگ بیضی	b
سرعت نسبی هوا و مایع	$u_r (m/s)$	عدد بدون بعد باند	Bo
دبی حجمی محلول پاشش	$U_{sol} (m^3/s)$	ضریب تخلیه	Cd
سرعت هوا	$v_{Air} (m/s)$	قطر روزنه افشانه	D (m)
سرعت جت مایع خروجی از افشانه	$v_j (m/s)$	ثابت تصحیح قطر قطره	$C_1$
سرعت متوسط نسبی هوا و مایع	$v_{mr} (m/s)$	قطر قطره	d (m)
حجم ذره کروی	$V_p (m^3)$	قطر قطره در روابط نظری	$d_0 (m)$
سرعت نسبی مایع و هوا	$v_{rel} (m/s)$	قطر میانگین ساتر	$d_{32} (m)$
سرعت نسبی مایع و هوا	$v_{rel-sheet} (m/s)$	قطر میانگین	$d_{10} (m)$
کار انجام شده توسط گاز روی مایع	$W_{air/liq} (j)$	مقدار عمومی قطر میانگین	$d_{ab} (m)$
عدد بدون بعد وبر	We	قطر سطح	$d_s (m)$
فاصله از روزنه افشانه	$X, X_{sheet} (m)$	قطر حجم	$d_v (m)$
لزجت دینامیک مایع و گاز	$\mu_l, \mu_g (kg/m.s)$	قطر جت مایع	$d_{jet} (m)$
ضخامت فیلم مایع	$\delta_{sheet} (m)$	عدد بدون تراکم پذیری سیال	E
چگالی هوا	$\rho_a, \rho_{Air} (kg/m^3)$	خروج از مرکز بیضی	$0 < e < 1$
چگالی مایع	$\rho_L, \rho_{Liq} (kg/m^3)$	ضریب تراکم پذیری سیال	e (N/m <sup>2</sup> )
چگالی گاز	$\rho_G (kg/m^3)$	عدد جریان	FN (Gal/h)
زاویه پاشش افشان	$\theta (degree)$	شتاب گرانش	g (m/s <sup>2</sup> )
اختلاف فشار تزریق مایع	$\Delta P_L (pa)$	نسبت دبی جرمی گاز به مایع	GLR
کشش سطحی مایع	$\gamma_{Liq} (N/m)$	انرژی جنبشی متوسط مایع و گاز	$K_{sheet}$
طول موج امواج فیلم مایع	$\lambda (m)$	دبی جرمی هوا	$\dot{m}_{Air} (kg/s)$
کشش سطحی	$\sigma (N/m)$	دبی جرمی مایع	$\dot{m}_{Liq} (kg/s)$
عدد پی	$\pi$	توان داده شده گاز به مایع	$P_{Air/Liq} (j/s)$

## چکیده:

در این تحقیق، مفاهیم بنیادی و عوامل مهم در فرآیندهای پاششی و تولید افشان<sup>۱</sup> مایع، معرفی و انواع افشانه<sup>۲</sup> مورد استفاده در صنعت، توصیف و طبقه بندی می شوند. برای بررسی خواص افشانه ها، از ظروف جمع آوری کننده مایع و روش عکسبرداری و پردازش تصویر استفاده شد. عکسبرداری توسط دوربین دیجیتال انجام شد. آزمایش هایی بر روی نیمرخ<sup>۳</sup> پاشش قطرات افشانه ها انجام و با استفاده از روش عکسبرداری، سرعت و اندازه متوسط قطرات، محاسبه شد. روش عکسبرداری و پردازش تصویر، روشی نسبتاً جدید و مناسب است و با پیشرفت تجهیزات و دانش روز، بهتر شده و توسعه می یابد. از جمله مزایای این روش، سهولت در استفاده، هزینه کمتر و تسریع در انجام آزمایش ها است. در بررسی نیمرخ پاشش افشانه ها، برای کاهش تعداد آزمایش ها، از روش تاگوچی<sup>۴</sup> و نرم افزار مینی تب<sup>۵</sup> نسخه ۱۵ استفاده شد. الگوی پاشش توسط ظروف جمع آوری کننده حجم مایع، بررسی و دبی حجمی مایع، هوا و ارتفاع از سطح، متغیر بودند. آزمایش ها نشان داد، که با افزایش دبی هوا و ارتفاع افشانه از سطح، گستره و زاویه تحت پوشش افشانه، افزایش می یابد. آزمایش های مربوط به افزایش زاویه پاشش با فشار و دبی هوا، یک افزایش با رابطه ای غیر خطی را نشان داد. با استفاده از روش عکسبرداری و پردازش تصویر، سرعت و قطر متوسط قطرات خروجی از افشانه و عدد چگالی، محاسبه شد. نتایج نشان داد که با فاصله از مرکز پاشش، سرعت متوسط قطرات، کاهش و در نتیجه، تعداد برخوردها کمتر و اندازه متوسط قطرات، افزایش می یابد. نتایج تجربی مربوط به روش عکسبرداری، با نتایج روش LDA<sup>۶</sup> و نتایج شبیه سازی شده توسط دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۷</sup> (CFD)، مقایسه شد و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج روش عکسبرداری و پردازش تصویر، نشان دهنده قابل قبول بودن روند تغییرات سرعت و اندازه متوسط قطرات است. هدف از انجام این تحقیق، معرفی انواع روش های تعیین خواص افشانه های دو سیاله، مقایسه محدودیت ها، مزایا و معایب هر روش و بررسی عملکرد این نوع از افشانه ها، به علت کاربرد فراوان آنها در صنعت است.

**کلمات کلیدی:** افشانه دو سیاله، نیمرخ افشان، توزیع اندازه قطرات، روش عکسبرداری و پردازش تصویر.

<sup>1</sup> - Spray.

<sup>2</sup> - Nozzle.

<sup>3</sup> - Profile.

<sup>4</sup> - Taguchi.

<sup>5</sup> - Minitab.

<sup>6</sup> - Laser Doppler Anemometry.

<sup>7</sup> - Computational Fluid Dynamics.



## فصل اول : مقدمه

### ۱-۱ معرفی موضوع :

این تحقیق به بررسی فرآیندهای پاششی و ابزارهایی مانند افشانه ها، می پردازد. بعضی از موارد مورد بررسی، پدیده افشان کردن<sup>۱</sup> و ایجاد افشان مایع، برای اهداف مختلف است. ابتدا به طور مختصر در مورد افشانه ها و ابزارهای پاششی توضیح داده و سپس انواع افشانه های مورد استفاده در صنعت، توصیف و طبقه بندی می شوند. روابط تجربی اندازه میانگین قطره، توسط افشانه های دو سیاله و عامل های موثر بر اندازه قطره، توصیف و آزمایش هایی روی سه نوع افشانه بادی، صورت می گیرد. سیستم های پاششی مانند افشانه ها<sup>۲</sup> یا ایجاد کننده های قطرات ریز مایع<sup>۳</sup>، کاربرد های وسیعی در زندگی روزمره و در صنایع مختلف دارند. در بخش های مختلفی مانند باغبانی و کشاورزی، صنعت کارواش یا شستشوی خودروها و همچنین در احتراق سوخت کوره ها در سیستم های گازوئیلی و دیزلی و توربین های گازی، بخصوص در سیستم های پوشش دهی در بستر سیال، مورد استفاده قرار می گیرند. تجربه نشان داده است، که یک دانش اولیه و کنترل توزیع اندازه قطرات، برای فرآیندهای مربوط به پوشش دهی و احتراق سوخت به ویژه در بسترهای سیال و سیستم های دیزلی، بسیار مهم و حیاتی است. بنابراین ضروری است، تا ملاحظات نظری و اهمیت های عملی تولید قطرات، توسط افشانه ها مورد مطالعه قرار گیرد.

افشانه ها نقش مهمی در فرآیندهای پوشش دهی و یکنواختی پوشش ایجاد شده دارند. با کنترل پاشش مایع، می توان محصولاتی یکنواخت ایجاد کرد و یا در مصرف سوخت، صرفه جویی کرد. افشانه مناسب دارای قطراتی با ابعاد یکنواخت و سرعت بهینه است. این امر به منظور پوشش دهی یکنواخت ذره و تبخیر به موقع قطرات پوشش داده شده با افشانه، برای تولید محصول مناسب در بستر سیال و یا عملکرد درست ابزارهای پاششی در صنعت ضروری است.

تکنولوژی طراحی، ساخت و تولید افشانه ها، باعث افزایش کیفیت پاشش و باعث صرفه جویی در مصرف سوخت و انرژی و بازده سیستم مورد نظر می شود. بنابراین بررسی این موضوع، تقسیم بندی افشانه ها، عامل ها و متغیرهای موثر روی اندازه قطرات نقش مهم و اساسی را ایفا می نماید. تمرکز بیشتر، روی مقدمات نظری افشانه های دو سیاله، انواع و کاربرد آنها است و در ادامه آزمایش هایی بر روی سه نوع افشانه دو سیاله متفاوت، انجام می شود.

<sup>1</sup> - Atomization=Creat a spray from liquid or converting to droplets.

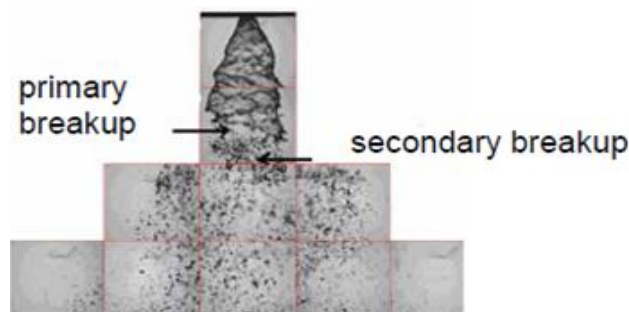
<sup>2</sup> - Nozzles.

<sup>3</sup> - Liquid Atomizers.

## ۲-۱ تشریح پدیده تولید قطرات افشانه و کاربردهای آن :

پدیده شکل گیری قطرات افشانه، فرآیندی است که طی آن، افشانه ای از قطرات ریز مایع، توسط اعمال فشار، به وسیله یک عامل خارجی (گاز یا نیروی فشاری)، به یک جریان مایع ایجاد می شود. اگر گاز عاملی برای تولید قطرات از یک سیال باشد، افشانه را دو سیاله می نامند. این پدیده در صنعت، بسیار مهم است. این فرآیند نتیجه دو نوع نیروی فعال است. نیروی آیرودینامیک که توسط سرعت نسبی بین مایع و گاز بوجود می آید و نیروی هیدرودینامیک که، در اثر وجود اغتشاش و ناپایداری در خود مایع ایجاد می شود. نیروی آیرودینامیکی باعث به وجود آمدن امواج در سطح مایع شده و رشته های ناپایداری را ایجاد می کند، سپس در اثر تنش ناگهانی به سیال، رشته های مایع از هم جدا شده و قطرات را شکل می دهند. با افزایش سرعت نسبی بین گاز و مایع شکست سیال بیشتر شده و تعداد قطرات افزایش و اندازه آن ها، کاهش می یابد.

در حقیقت کار افشان کردن، دادن انرژی به خوراک مایع، به منظور شتاب دادن و تقسیم شدن مایع بوده و در نهایت به صورت افشان پخش شود. جریان مایع باید به اندازه کافی آشفته باشد، تا بتواند از هم گسیخته شود. با توجه به شرایط تولید قطرات، انعطاف پذیری افشانه و نیمرخ پاشش افشان، انواع مختلفی از افشان کننده ها<sup>۱</sup> موجود هستند. این افشانه ها از انرژی فشاری، جنبشی و صوتی، جهت تقسیم و پخش مایع استفاده می کنند [۱]. عموماً، دلیل اصلی برای تبدیل کردن یک مایع به قطرات، بدست آوردن یک سطح، یا افزایش ناحیه مورد نظر، برای افزایش نرخ تبخیر است. علی رغم فهم مشکل و مدلسازی سخت پدیده تولید قطرات توسط یک افشانه، خوشبختانه در عمل، افشان کردن یک مایع، نسبتاً<sup>۲</sup> به سادگی انجام می شود و شرایط افشانه، برای عملیات های مختلف صنعتی با اهمیت است [۲].



شکل ۱-۱: تصویری از شکست اولیه و ثانویه فیلم مایع به قطرات [۳].

<sup>1</sup> - Atomizers.

### ۱-۳ تقسیم بندی کلی افشانه ها بر مبنای تعداد سیال:

از نظر تعداد سیال، افشانه ها به دو دسته کلی زیر تقسیم می شوند:

۱- افشانه های هیدرولیک<sup>۱</sup>: در این افشانه ها مایع در اثر فشار خودش به قطرات ریز تبدیل می شود، که معمولاً به آن، تک سیاله نیز می گویند. بنابراین فشار مایع باید زیاد باشد. مانند آبپاش ها و افشانه های پیستونی.

۲- افشانه های بادی<sup>۲</sup>: در این افشانه ها جت مایع در اثر فشار زیاد جریان هوا یا گاز، به قطرات ریز تبدیل می شود و دارای انواع دو و سه سیاله است. مانند افشانه های رنگ پاش و سمپاش.

### ۱-۳-۱ انواع افشانه های بادی :

این افشانه ها را می توان به دو دسته کلی دو سیاله و سه سیاله، در انواع زیر تقسیم نمود:

۱- افشانه دو سیاله اختلاط داخلی<sup>۳</sup>: تماس جریان گاز و مایع داخل سر افشانه.

۲- افشانه دو سیاله اختلاط خارجی<sup>۴</sup>: تماس جریان گاز و مایع در خارج از کلاهک سر افشانه.

۳- افشانه دو سیاله دارای کلاهک بادی<sup>۵</sup>: تماس جریان گاز و مایع در لبه سر دوار افشانه.

۴- افشانه سه سیاله: تماس دو جریان گاز با مایع در سر افشانه.

البته در این پروژه، تنها به بررسی افشانه های دو سیاله و مطالعه عملکرد آنها اختصاص دارد [۲].

### ۱-۴ معرفی افشانه های دو سیاله :

افشانه های دو سیاله، شامل افشانه های ساده و ایجاد کننده پیش لایه هستند. در نوع پیش لایه، ابتدا مایع به صورت یک لایه نازک پیوسته درآمده و سپس در معرض جریان هوای افشان کننده قرار می گیرد و پخش می شود، که باعث کنترل بهتر اندازه قطرات می شود. در سال ۲۰۰۷، محققى به نام نیرو<sup>۷</sup> بیان داشت که، افزایش نسبت دبی گاز به مایع، باعث کاهش در متوسط اندازه قطرات می شود و زمانی این فرآیند مفید است، که دو طرف ورق مایع در معرض جریان گاز باشد.

در شکل ۱-۲ تصویری از دو نوع افشانه دو سیاله، نشان داده شده است. در نوع اختلاط داخلی جریان گاز و مایع در داخل کلاهک افشانه و در نوع اختلاط خارجی در خارج از کلاهک افشانه، با هم مخلوط می شوند. هرکدام از این نوع افشانه ها مزایا و استفاده خاص خود را دارند، که در ادامه هریک از آنها، توضیح داده می شود [۲].

<sup>1</sup> - Hydraulic Nozzles.

<sup>2</sup> - Pneumatic Nozzles.

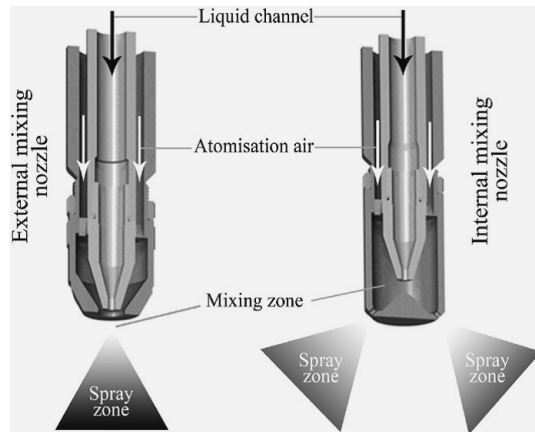
<sup>3</sup> - Internal-mix two-fluid nozzle.

<sup>4</sup> - External-mix two-fluid nozzle.

<sup>5</sup> - Pneumatic cap.

<sup>6</sup> - Prefilming Nozzle.

<sup>7</sup> - Niro.



شکل ۱-۲: افشانه های دو سیاله. سمت چپ: اختلاط خارجی ساده. سمت راست: اختلاط داخلی ساده [۲].

#### ۱-۴-۱ افشانه های دو سیاله اختلاط داخلی :

در این نوع، اختلاط جریان ها در داخل کلاهک افشانه بوده و مزیت این نوع نسبت به افشانه های اختلاط خارجی، انتقال انرژی موثرتر بین مایع و گاز است. در این افشانه ها، فشار مورد نیاز برای تزریق مایع، بستگی به مکانی دارد که مایع تزریق می شود. در شکل ۱-۳ از چپ به راست، درجه اختلاط دو سیال، داخل افشانه افزایش می یابد. مایع از طریق شکاف توزیع کننده، وارد قسمت ایجاد کننده پیش لایه نازک<sup>۱</sup> می شود و جریان محوری گاز به آن شتاب می دهد. سپس مایع به لبه جدا کننده منتقل می شود. این لبه از دو طرف، در معرض جریان گاز قرار دارد. مایع به دیواره محفظه چرخش می چسبد و به وسیله جریان گاز، به شکل یک فیلم به سمت لبه جدا کننده انتقال می یابد و فیلم مایع، آنجا شکسته می شود. این نوع از افشانه ها برای افشان کردن سوسپانسیون ها مناسب هستند.

البته در این تحقیق از سه نوع افشانه استفاده شد، که افشانه های شماره ۲ و ۳ از نوع اختلاط داخلی هستند. افشانه شماره ۲ بین دو حالت b و d در شکل ۱-۳ است، که در آن حالت چرخش و اختلاط هوا و مایع در طول مسیر وجود دارد و سیال با کمک فشار هوا، به جلو حرکت کرده و با عبور از لوله مارپیچ انتهای مسیر، چرخش پیدا کرده و فیلم مایع تشکیل شده در انتهای افشانه، با عبور از روزنه پاره شده و به قطرات ریز افشان می شود. افشانه شماره ۳ مشابه حالت c در شکل ۱-۳ است. در این افشانه یک کلاهک مخروطی روی خروجی جریان مایع وجود دارد، که فیلم مایع خروجی در انتهای افشانه، در اثر برخورد با جریان هوا، شکسته و به قطرات تبدیل می شود [۲].

<sup>1</sup> - Prefilm.