بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

گروه مهندسی شیمی

# شبیه سازی عددی اثرات الکترواستاتیک بر ضریب انتقال حرارت و هیدرودینامیک یک قطره منفرد به کمک CFD

**از**

بابک نمازی

**استاد راهنما:**

دکتر محمد علی صالحی

**استاد مشاور:**

دکتر جواد مختاری

بهمن ماه ۱۳۹۲

**تقدیم**

**به دامان سبز مادر**

**و دست های خسته پدرم**

از استاد گرامی جناب آقای دکتر صالحی بسیار

سپاسگذارم چرا که بدون راهنماییهای ایشان

تامین این پایان نامه بسیار مشکل می نمود.

# فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

فهرست جداول ..... ح

فهرست اشکال ..... ط

فهرست علائم اختصاری ..... ک

چکیده فارسی ..... م

چکیده انگلیسی ..... ن

**فصل اول: پیشگفتار**

۱-۱ مقدمه ..... ۱

۱-۲ اهداف پایان نامه ..... ۲

۱-۳ مراحل انجام کار ..... ۲

۱-۴ ساختار پایان نامه ..... ۲

**فصل دوم: مقدمه ای بر الکترو اسپری**

۲-۱- پاشش(اسپری کردن) ..... ۴

۲-۲ دسته بندی انواع افشانه ها ..... ۴

۲-۳ کاربردهای پاشش مایعات ..... ۵

۲-۴ الکترواسپری ..... ۶

۲-۵ مزایای الکترواسپری ..... ۷

۲-۶ دسته بندی حالتهای کلی الکترواسپری ..... ۸

۲-۶-۱ حالت قطره ای ..... ۹

۲-۶-۲ حالت جت ..... ۱۱

۲-۷ دسته بندی حالتهای مختلف الکترواسپری ۱۲
۲-۷-۱ حالت قطره ای ۱۲
۲-۷-۲ حالت ریز قطره ای ۱۳
۲-۷-۳ حالت دوکی شکل ۱۳
۲-۷-۴ حالت چند دوکی ۱۳
۲-۷-۵ حالت سطح مایع چند شاخه شده ۱۴
۲-۷-۶ حالت جت نوسان کننده ۱۴
۲-۷-۷ حالت جت فرفره ای ۱۴
۲-۷-۸ حالت جت مخروطی ۱۵
۲-۷-۹ حالت جت چندگانه ۱۵
۲-۷-۱۰ حالت جت چند شاخه ۱۶
۲-۸ پارامترهای تأثیر گذار بر فرآیند الکترواسپری ۱۶
۲-۸-۱ شرایط عملیاتی ۱۷
۲-۸-۲ خصوصیات مایع ۲۰
۲-۹ مروری بر مقالات مدلسازی فرآیند الکترواسپری ۲۴
۲-۹-۱ نقد و تحلیل مقاله ها ۳۱

**فصل سوم: تئوری دینامیک سیالات محاسباتی و معادلات حاکم در فرآیند الکترو اسپری**

۳-۱ مقدمه ۳۲
۳-۲ دینامیک سیالات محاسباتی ۳۲
۳-۳ مقدمه ای بر حل عددی مدل های جریان های چند فازی ۳۳
۳-۳-۱ دیدگاه اویلری– لاگرانژی ۳۳
۳-۳-۲ دیدگاه اویلری- اویلری ۳۴

۳-۴ مدلهای مختلف دیدگاه اویلری- اویلری ۳۴
۳-۴-۱ مدل اویلری ۳۵
۳-۴-۲ مدل مخلوط ۳۵
۳-۴-۳ مدل حجم سیال ( VOF ) ۳۵
۳-۵ تئوری مدل حجم سیال ۳۷
۳-۶ نیروی الکترواستاتیک ۳۸
۳-۷ معادله ضریب انتقال حرارت ۳۹

**فصل چهارم: شبیه سازی عددی و نتایج**

۴- ۱مقدمه ۴۰
۴-۲ مراحل شبیه سازی حاضر ۴۱
۴- ۲- ۱ تولید هندسه سیستم ۴۱
۴-۲-۲ بررسی کیفیت شبکه ۴۲
۴-۲-۳ بررسی خاصیت استقلال از شبکه ۴۴
۴-۲-۴ خواص فیزیکی مواد ۴۴
۴-۲-۵ انتخاب روش محاسباتی و فرمول بندی حل ۴۵
۴-۲-۶ شرایط مرزی معادله مومنتوم ۴۶
۴-۲-۶-۱ شرط مرزی سرعت ورودی ۴۷
۴-۲-۶-۲ شرط مرزی دیواره ۴۷
۴-۲-۶-۳ شرط مرزی تقارن ۴۷
۴-۲-۷ شرط مرزی معادله الکترواستاتیک ۴۸
۴-۲-۸ منابع خطا ۴۸
۴-۲-۹ نتایج مدلسازی هیدرودینامیکی فرآیند الکترواسپری ۴۹

۴-۲-۹-۱ نتایج مدلسازی با سرعت۰/۰۰۷ متر بر ثانیه از مایع ۴۹

۴-۲-۹-۲ نتایج مدلسازی با سرعت۰/۰۷ متر بر ثانیه از مایع ۵۲

۴-۲-۱۰ بررسی صحت نتایج ۵۶

۴-۲-۱۱ محاسبات ضریب انتقال حرارت جابجایی ۵۶

۴-۲-۱۲ نتایج محاسبات ضریب انتقال حرارت جابجایی ۵۷

**فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات**

۵-۱ نتیجه گیری ۵۸

۵-۲ پیشنهادات ۵۹

مراجع و منابع ۶۰

# فهرست جداول

**عنوان** **صفحه**

جدول"۴-۱" زمان تشکیل قطره و اندازه آن در تعداد سلول های مختلف با اعمال پتانسیل الکتریکی ۳ کیلو ولت ..... ۴۴

جدول"۴-۲" خواص فیزیکی هوا و اتیلن گلایکول در ۲۵ درجه سانتیگراد ..... ۴۵

جدول"۴-۳" خواص فیزیکی هوا در ۲۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد ..... ۵۷

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل"۲-۱" مقایسه بین روش اسپری(الف)و الکترواسپری(ب) ..... ۶

شکل"۲-۲" اثر دبی جریان بر نرخ تولید قطرات در فرآیند الکترواسپری ..... ۹

شکل"۲-۳" نحوه جدا شدن قطره در حالت قطره‌ای و تأثیر میدان الکتریکی بر این فرآیند ..... ۱۰

شکل"۲-۴" جدا شدن قطرات مایع به علت ناپایداری پیچشی ..... ۱۱

شکل"۲-۵" انواع الکترواسپری ..... ۱۶

شکل"۲-۶" تأثیر شدت میدان الکتریکی و پارامترهای موثر بر آن بر اندازه قطرات تولید شده در روش الکترواسپری ..... ۱۸

شکل"۲-۷" تأثیر ولتاژ اعمال شده و انتقال از حالت قطره‌ای به حالت جت ..... ۱۹

شکل"۲-۸" تأثیر هدایت الکتریکی مایع و تأثیر میدان الکتریکی بر ایجاد قطرات ..... ۲۱

شکل"۲-۹" تشکیل ریزقطره در فرآیند الکترواسپری ..... ۲۲

شکل"۲-۱۰" نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی برای جت اتیلن گلایکول در دو دبی متفاوت ..... ۲۴

شکل"۲-۱۱" موازنه نیروهای وارد شده بر قطره چسبیده به دهانه نازل ..... ۲۵

شکل"۲-۱۲" میدان سرعت جت مخروطی هپتان در پتانسیل الکتریکی۴/۵ کیلو ولت ..... ۲۷

شکل"۲-۱۳" نتایج مدلسازی تشکیل جت مخروطی هپتان ..... ۲۸

شکل"۲-۱۴" تجمع بار الکتریکی روی سطح آزاد مایع(چپ)و تجمع نیروی الکترواستاتیک روی سطح آزاد مایع(راست) ..... ۲۸

شکل"۲-۱۵" نمایی از جت مخروطی چند گانه ..... ۲۸

شکل "۲-۱۶" میدان سرعت سیال(چپ) و توزیع بار الکتریکی در سطح آزاد سیال(راست) ..... ۳۰

شکل"۲-۱۷" نمایی از تاثیر مقدار گام زمانی در مدلسازی ..... ۳۰

شکل"۳-۱" نمایی از سلول های محاسباتی در سطح مشترک دو فاز در مدل حجم سیال ..... ۳۶

شکل"۴-۱" نمای شماتیک از هندسه سیستم ..... ۴۲

**عنوان** **صفحه**


شکل"۴-۲" شبکه چهار وجهی تولید شده ..... ۴۳

شکل"۴-۳" تأثیر ولتاژ اعمال شده و انتقال از حالت قطره‌ای به حالت جت ..... ۴۵

شکل"۴-۴" نمای کلی از نحوه استفاده از کد برای حل معادله مومنتوم ..... ۴۶

شکل"۴-۵" تشکیل قطره بدون حضور میدان الکتریکی ..... ۵۰

شکل"۴-۶" تشکیل جت و ریز قطره ها با اعمال پتانسیل الکتریکی ۳ کیلو ولت بر نازل ..... ۵۰

شکل"۴-۷" تشکیل جت و ریز قطره با اعمال پتانسیل الکتریکی ۵ کیلو ولت بر نازل ..... ۵۱

شکل"۴-۸" تشکیل جت و ریز قطره با اعمال پتانسیل الکتریکی ۸ کیلو ولت بر نازل ..... ۵۱

شکل"۴-۹" تشکیل جت و ریز قطره با اعمال پتانسیل الکتریکی ۱۵ کیلو ولت بر نازل ..... ۵۲

شکل"۴-۱۰" تشکیل قطره بدون حضور میدان الکتریکی ..... ۵۳

شکل"۴-۱۱" تشکیل قطره با اعمال پتانسیل الکتریکی۰/۵ کیلو ولت بر نازل ..... ۵۳

شکل "۴-۱۲" تشکیل قطره با اعمال پتانسیل الکتریکی۱/۵ کیلو ولت بر نازل ..... ۵۴

شکل"۴-۱۳" تشکیل قطره با اعمال پتانسیل الکتریکی ۲ کیلو ولت بر نازل ..... ۵۴

شکل"۴-۱۴" تشکیل قطره با اعمال پتانسیل الکتریکی ۲/۵ کیلو ولت بر نازل ..... ۵۵

شکل"۴-۱۵" تشکیل قطره با اعمال پتانسیل الکتریکی ۳ کیلو ولت بر نازل ..... ۵۵

شکل"۴-۱۶" ابعاد قطرات تولید شده بر حسب پتانسیل الکتریکی اعمال شده بر نازل در شبیه سازی حاضر ..... ۵۶

شکل"۴-۱۷" تغییرات ضریب انتقال حرارت جا بجایی بر حسب پتانسیل الکتریکی اعمال شده بر نازل ..... ۵۷

## فهرست علائم اختصاری

| | |
|---|---|
| ولتاژ بحرانی | $V_c$ (v) |
| قطر قطره | $d$ (m) |
| هدایت الکتریکی مایع | k ($S/m$) |
| کشش سطحی | $\sigma$ ($N/m$) |
| ویسکوزیته | μ (pa.s) |
| شعاع قطره | r(m) |
| نفوذپذیری الکتریکی نسبی | $\varepsilon_r$ |
| نفوذپذیری الکتریکی خلاء | $\varepsilon_0$ $\left(C^2/N.m^2\right)$ |
| نیروی الکترواستاتیک | $F_e$(N) |
| نیروی وزن | $F_g$(N) |
| نیروی تنش سطحی | $F_{st}$(N) |
| قطر سوراخ الکترود حلقوی | $D_e$(m) |
| اختلاف پتانسیل اعمال شده بین نازل و الکترود حلقوی | θ(v) |
| فاصله دهانه نازل تا الکترود حلقوی | L(m) |
| مساحت سطح قطره | S($m^2$) |
| ضریب تصحیح هارکینس | F |
| عدد پرانتل | Pr |
| شعاع رشته متصل بین قطره و سطح مایع | W(m) |
| شتاب جاذبه | $g(m/s^2)$ |
| چگالی | ρ($kg\ /\ m^3$) |
| عدد رینولدز | Re |

| | |
|---|---|
| عدد وبر | We |
| ضریب انتقال حرارت جابجایی | $h(W/m^2.^{\circ}C)$ |
| عدد شدت میدان الکتریکی | Es |
| قطر نازل | $D_n(m)$ |
| سرعت سیال | $U(^m/_s)$ |
| ضریب انتقال حرارت هدایتی | $K(w/m.^{\circ}c)$ |
| اختلاف پتانسیل الکتریکی | V(v) |
| تانسور تنش ماکسول | T |
| زمان | t(s) |
| شدت میدان الکتریکی | $E_0(^V/_m)$ |
| قطر دانه | $D_p(m)$ |
| عدد ناسلت | Nu |

## چکیده

**شبیه سازی عددی اثرات الکترواستاتیک بر ضریب انتقال حرارت و هیدرودینامیک یک قطره منفرد به کمک *CFD***

**بابک نمازی**

در این پژوهش هیدرودینامیک پاشش الکتریکی(الکترواسپری) و تغییرات ضریب انتقال حرارت در پتانسیل های الکتریکی مختلف با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته است. مایع مورد استفاده در این شبیه سازی اتیلن گلایکول می باشد که دارای ویسکوزیته و ضریب نفوذپذیری الکتریکی مناسبی برای فرآیند پاشش الکتریکی می باشد. همچنین از هوا به عنوان فاز گاز استفاده شده است. برای این جریان دوفازی از مدل حجم سیال برای حل معادله مومنتوم استفاده شد. همچنین برای یافتن ضریب انتقال حرارت از رابطه تجربی ویتاکر که برای جریان گاز و مایع روی سطوح کروی صادق است، استفاده شد. برای بررسی هیدرودینامیک الکترواسپری از مایع در دو دبی متفاوت استفاده شد و در هر دو حالت، پتانسیل های مختلف الکتریکی به نازل اعمال شده است. نتایج شبیه سازی با نتایج تحقیقات آزمایشگاهی که با مایعات مختلف انجام شده است مطابقت داشت و نشان داد که با افزایش میزان پتانسیل الکتریکی اعمال شده، از قطر قطرات و زمان تشکیل آنها به دلیل غلبه نیروی وزن و الکترواستاتیک بر نیروی تنش سطحی کاسته می شود. همچنین با استفاده از نتایج شبیه سازی هیدرودینامیک قطره، ضریب انتقال حرارت جابجایی در پتانسیل های الکتریکی مختلف محاسبه شد که نشان داد با افزایش پتانسیل الکتریکی، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.

**کلمات کلیدی:** الکترواسپری، هیدرودینامیک، ضریب انتقال حرارت، اتیلن گلایکول.

## *Abstract*

***Numerical Simulation of Heat Transfer Coefficient and Hydrodynamics of Single Droplet Affected by Electrostatic Forces with the Aid of CFD***

***Babak Namazi***

*In this study, Electrospray hydrodynamics and electrical potential dependency of heat transfer coefficient were investigated by computational fluid dynamics(CFD). Ethylene glycol was used as the experimental liquid which has appropriate viscosity and relative permittivity in electrospray process. Gas phase was Air. VOF method was applied to solve momentum equation of these two phase flow and Whitaker empirical relationship for gas and liquid flow on sphere was also applied to calculate the heat transfer coefficient. Two different liquid flows were used to investigate hydrodynamics of electrospray and in each one, different electric potentials were applied on nozzle. The results of simulation were in accordance with experiments which had used different liquids and showed that because of domination of surface tension by gravity and electric forces, diameter of droplets and their formation time were decreased. By using the results of hydrodynamic simulation of droplet, convective heat transfer coefficient of droplet was calculated in various electrical potentials that showed heat transfer coefficient increased by growth of electrical potential.*



*Electrospray, Hydrodynamic, Heat transfer coefficient, Ethylene glycol.* ***Keywords****:*

# فصل اول

# پیشگفتار

## ۱-۱ مقدمه

پاشش مایعات مکانیسمی است که از آن برای ایجاد قطرات بسیار کوچکی از آن مایع در یک محیط گازی استفاده می شود. این فرآیند از گذشته به منظور افزایش سطح تماس بین مایع و گاز در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار گرفته است. یکنواخت نبودن اندازه قطرات تولید شده در این روش را می توان از جمله معایب آن دانست. این روش به عنوان یکی از ساده ترین روش های به کار گرفته شده برای افزایش سطح مشترک گاز- مایع است. هر چند در بسیاری از کاربردهای صنعتی توزیع اندازه قطرات تولید شده تاثیر چندانی بر بازده کلی سیستم ندارد و هدف اصلی صرفا ایجاد قطرات مایع می باشد، اما در سیستم های حساس، گستردگی توزیع اندازه قطرات سبب کاهش بازده می گردد. به همین دلیل یافتن روش هایی برای کنترل فرآیند پاشش از اهمیت برخوردار است.

به طور کلی عوامل موثر در فرآیند پاشش را به می توان به دو دسته تقسیم کرد:

- خواص فیزیکی مایع مانند ویسکوزیته، چگالی، کشش سطحی.
- شرایط عملیاتی مانند دبی مایع.

در چند دهه اخیر استفاده از میدان الکتریکی برای تولید قطراتی با اندازه یکسان به امری متداول تبدیل شده است و از آن برای تغییر شرایط عملیاتی که در بالا ذکر شد، استفاده می شود. عموما این نیرو به کمک نیروی وزن سبب جدا شدن زود هنگام مایع از نازل شده و همین امر موجب افزایش فرکانس تولید قطرات و کاهش میزان سیال جدا شده از نازل و در نتیجه کاهش قطر قطره می شود. استفاده از این روش همچنین شرایطی را فراهم می کند تا بتوان دانه های بسیار ریز از برخی مواد، که ممکن است روشی برای تولید آنها وجود نداشته باشد را تولید نمود.

## ۱-۲ اهداف پایان نامه

مطالعاتی که تا کنون برای شناخت فرآیند الکترواسپری صورت گرفته است به دو دسته مطالعات آزمایشگاهی و شبیه سازی تقسیم می شود. مطالعات آزمایشگاهی گسترده ای در این زمینه انجام شده است و حالات مختلف این فرآیند بررسی شده است. اما شبیه سازی های صورت گرفته در این زمینه بیشتر به فرآیند تشکیل جت مایع[1] پرداخته اند و کمتر توجهی به حالت تشکیل قطره[2] شده است. در ادامه بعد از پی بردن به صحت نتایج شبیه سازی هیدرودینامیکی فرآیند تشکیل قطره به بررسی اثرات الکترواستاتیک بر ضریب انتقال حرارت پرداخته خواهد شد. در این شبیه سازی از سیال نیوتنی اتیلن گلایکول که دارای خواص فیزیکی مناسب و همچنین نفوذپذیری الکتریکی بالایی است استفاده شده است.

## ۱-۳ مراحل انجام کار

- مطالعات کتابخانه ای به منظور درک کلی فرآیند
- تعیین متغییر های تاثیر گذار بر فرآیند
- انتخاب داده های مناسب
- شبیه سازی فرآیند
- صحت سنجی نتایج

## ۱-۴ ساختار پایان نامه

پژوهش حاضر علاوه بر پیشگفتار شامل چهار فصل دیگر می باشد که مروری بر آنها خواهیم کرد. فصل دوم که تحت عنوان مقدمه ای بر الکترواسپری از آن نام برده شده است شامل دو بخش کلی می باشد. در بخش نخست به معرفی فرآیند الکترو اسپری و کاربرد های آن و همچنین عوامل موثر بر آن پرداخته شده است و از کارهای آزمایشگاهی که تا کنون

[1] Jet mode

[2] Dripping mode

انجام شده است برای درک بهتر موضوع استفاده شده است. بخش دوم به مروری بر پژوهش های صورت گرفته در زمینه شبیه سازی این فرآیند اختصاص یافته است.

فصل سوم که تحت عنوان تئوری دینامیک سیالات محاسباتی و معادلات حاکم در فرآیند الکترواسپری آورده شده است، به معرفی اجمالی روش های حل معادلات مربوط به جریان های چند فازی و ویژگی های هر کدام از آنها می پردازد. از آن جا که مدل مناسب برای شبیه سازی پیش رو مدل حجم سیال است، تئوری حجم سیال و معادلات پیوستگی و انتقال مومنتوم به تفصیل شرح داده شده است. در انتها نیز به معادله ای که از آن برای محاسبه ضریب انتقال حرارت استفاده شده است، اشاره خواهد شد.

در فصل چهارم که تحت عنوان مدلسازی عددی و نتایج آورده شده است، خواص فیزیکی سیال ، هندسه و ابعاد سیستم، شرایط مرزی و شرایط عملیاتی شرح داده شده است. در انتها نیز نتایج حاصل از شبیه سازی فرآیند الکترو اسپری قابل مشاهده است که صحت اعتبار آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

و سرانجام در فصل پنجم به بحث و نتیجه گیری از نتایج شبیه سازی پرداخته شده است و پیشنهاداتی برای کارهای تحقیقاتی آینده که در این زمینه می تواند انجام شود، ارائه شده است.

# فصل دوم

# مقدمه ای بر الکترواسپری