

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

مدلسازی توزیع رطوبت در اسپری پاشش آب تحت تاثیر جریان هوا

نگارنده:

بهزاد عزیزی

استاد راهنما:

دکتر علی سر رشته داری

استاد مشاور:

دکتر محسن نظری

اسفند ۱۳۹۹

اثری کوچک است، خیلی کوچک و شاید هیچ؛
اما به یاد عهد قدیم و رسم ندیم، تقدیم می شود به:

اولین و مهربان ترین آموزگار زندگی ام، پروردگار یگانه؛

تقدیم می شود به پروانه عزیزتر از جانم؛ آنان که امروز، بیشتر از دیروز و نه به اندازه ی فردا،

دوستشان دارم...

سپاس

سپاس خدایی را که اول و آخر وجود است، بی آنکه اولی بر او پیشی گیرد یا آخری پس از او باشد؛

خدایی که دست هر چشمی از دامان دیدارش کوتاه است و فهم هر کبوتر توصیف‌گری از پرواز در آسمان
وصفش عاجز....

برخود لازم می‌دانم از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر علی سررشته‌داری که بی‌دریغ مرا در مسیر رسیدن به
هدف‌هایم و انجام این پژوهش پشتیبانی کرد، نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشم. در پایان از آقای
علی‌حزائی، و سایر عزیزانی که در انجام این تحقیق مرا یاری کردن متشکرم.

تعهد نامه

اینجانب بهزاد عزیزی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی توزیع رطوبت در اسپری پاشش آب تحت تاثیر جریان هوا تحت راهنمایی دکتر علی سررشته داری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۱۳۹۹/۱۲/۰۱

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

اسپری در اکثر فرایندهای متنوع و مهم صنعتی از قبیل احتراق در محفظه احتراق توربینهای گازی و یا در موتورهای احتراق داخلی، خشک کننده ها، سرمایش به کمک تبخیر اسپری، تمیز کننده های سطح اجسام، چاپگرهای جوهر افشان ، نیروگاه ها و نظایر آن کاربرد دارد. با توجه به اهمیت موضوع تامین رطوبت و جلوگیری از تشکیل ذرات به صورت قطرات مایع در کاربری های مهم صنعتی و امکان ایجاد جریان ثانویه برای دستیابی به شرایط مطلوب تر لازم است شناخت دقیقتری از رفتار ذرات مایع تحت تاثیر میدان جریان سیال داشته باشیم. در تحقیق حاضر به دنبال بررسی تاثیر الگوی جریان محیط اطراف بر ذرات اتمیزه شده به منظور محاسبه تاثیر سرعت هوا و قطر اولیه قطرات بر مقدار تبخیر و توزیع رطوبت یکنواخت تری هستیم. برای مدلسازی تبخیر قطرات از روش لاگرانژ – اوپلرین استفاده شده که بر این اساس چهار مدل تبخیر در شرایط مختلف استخراج شده است. نتایج نشان میدهند که تغییرات قطر اولیه قطره بیشترین تاثیر در مقدار تبخیر را داراست و همچنین افزایش سرعت هوای محیط فقط در یک بازه باعث افزایش تبخیر میگردد. نوع شکست تزریق سیال مایع بر حسب نمودار رینولدز بر وبر و نوع شکست قطرات بر حسب عدد وبر و همچنین توزیع قطرات در طول مسیر جریان مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: اسپری ، تبخیر ، قطرقطره ، مدلسازی ، فاز گسسته ، فاز پیوسته

فهرست مطالب

فصل ۱: ۱

مقدمه ۱

- ۱-۱- تعریف مسئله ۲
- ۲-۱- ضرورت انجام تحقیق ۲
- ۳-۱- اهداف تحقیق ۳
- ۴-۱- روش انجام تحقیق ۳
- ۵-۱- ساختار پایان نامه ۴
- ۶-۱- پیشینه تحقیق ۴
- ۷-۱- مقدمه ای بر جریان های چند فازی ۶
- ۸-۱- روشهای پودر کردن (افشان کردن) سیال ۶
- ۱-۸-۱- مقدمه ۶
- ۲-۸-۱- اتمایزر چرخشی ۷
- ۳-۸-۱- اتمایزرهای جت فشاری ۸
- ۴-۸-۱- اتمایزرهای جت برخوردی ۱۱
- ۹-۱- روش های تعیین اندازه ی قطره ۱۱
- ۱-۹-۱- مقدمه ۱۱
- ۲-۹-۱- روش شمارش پالس ۱۱
- ۱۰-۱- روش واکس و قطره منجمد ۱۲
- ۱۱-۱- روش فتوگرافی ۱۳

فصل ۲: ۱۵

شکست و فروپاشی قطره ۱۵

- ۱-۲- اعداد بی بعد ۱۶
- ۲-۲- شکست اولیه ۱۶
- ۳-۲- شکست ثانویه ۱۸
- ۴-۲- محاسبه عدد وبر بحرانی بر مبنای مدل تشابهی تیلور ۲۰

۲۵.....	۵-۲- تحلیل ناپایداری کلوین-هلمهولتز در سطح قطره
۲۷.....	۶-۲- مدل ها و چگونگی شکل گیری اسپری
۲۷.....	۶-۲-۱- مدل های برخورد قطرات
۲۸.....	۶-۲-۱-۱- مدل برخورد بهبود یافته
۳۲.....	۶-۲-۲- مدل های نفوذ
۳۳.....	۶-۲-۳- مدل نفوذ ویلیامز
۳۳.....	۶-۲-۴- مدل نفوذ گاسمن
۳۴.....	۶-۲-۵- تاثیر پارامتر های مختلف بر مقدار نفوذ
۳۵.....	۶-۲-۶- تاثیر فشار پاشش بر مقدار نفوذ
۳۶.....	۶-۲-۷- مدل های شکست
۳۹.....	۶-۲-۸- مدل های جریان
۴۱.....	۷-۲- مدلسازی اغتشاش
۴۲.....	۷-۲-۱- مدل اغتشاش $\sigma - \sigma$ استاندارد
۴۲.....	۷-۲-۲- مدل اغتشاش $\sigma - \sigma$ RNG
۴۳.....	۸-۲- مدلسازی نیروی پسا

فصل ۳: ۴۵

معادلات و مدلسازی ریاضی ۴۵

۴۶.....	۳-۱- معادلات کلی
۴۶.....	۳-۱-۱- مقدمه
۴۷.....	۳-۱-۲- فاز پیوسته
۴۷.....	۳-۱-۳- فاز گسسته
۴۸.....	۳-۱-۴- اتصال بین فاز گسسته و پیوسته
۴۸.....	۳-۱-۵- معادله ممنتوم و انرژی
۴۹.....	۳-۲- معادلات حاکم
۴۹.....	۳-۲-۱- مقدمه
۴۹.....	۳-۲-۲- فرضیات
۵۰.....	۳-۲-۳- مدل قطره
۵۰.....	۳-۲-۴- مدل حرکت قطرات
۵۱.....	۳-۲-۵- تغییرات اندازه قطره
۵۳.....	۳-۲-۶- معادله انتقال جرم قطره
۵۵.....	۳-۲-۷- معادله انتقال حرارت قطره
۵۷.....	۳-۲-۸- معادلات فاز گاز
۵۹.....	۳-۲-۹- تغییرات سرعت قطره
۶۰.....	۳-۲-۱۰- تغییرات دمای قطره

فصل ۴:

۶۳

روش حل و نتایج

۶۳

- ۶۴-۱- مقدمه..... ۶۴
- ۶۵-۲- روش حل..... ۶۵
- ۶۵-۱-۲-۴- معادلات حاکم بر فاز پیوسته..... ۶۵
- ۶۶-۲-۲-۴- معادلات حاکم بر فاز گسسته..... ۶۶
- ۶۶-۳- هندسه..... ۶۶
- ۶۷-۴- شبکه بندی..... ۶۷
- ۶۸-۱-۴-۴- کیفیت و استقلال از شبکه..... ۶۸
- ۶۹-۵-۴- مدل آشفتهگی..... ۶۹
- ۷۰-۶-۴- شبیه سازی فاز گسسته..... ۷۰
- ۷۰-۷-۴- شرایط مرزی..... ۷۰
- ۷۱-۸-۴- صحت سنجی..... ۷۱

فصل ۵:

۷۵

بررسی نتایج و پیشنهادات

۷۵

- ۷۶-۱- مقدمه..... ۷۶
- ۷۶-۲-۵- سرعت هوا ۰/۷۷ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۲ میلیمتر..... ۷۶
- ۷۹-۳-۵- سرعت هوا ۰/۷۷ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۰۵ میلیمتر..... ۷۹
- ۸۲-۴-۵- سرعت هوا ۰,۳۸۵ متر بر ثانیه و قطر متوسط قطرات ۰,۱ میلیمتر..... ۸۲
- ۸۴-۵-۵- سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۱ میلیمتر..... ۸۴
- ۸۸-۶-۵- تاثیر قطر اولیه بر تبخیر..... ۸۸
- ۹۲-۷-۵- تاثیر سرعت هوا بر تبخیر..... ۹۲
- ۹۸-۸-۵- توزیع قطرات در شکست تزریق سیال مایع..... ۹۸
- ۹۹-۹-۵- توزیع قطرات در طول جریان..... ۹۹
- ۱۰۱-۱۰-۵- نتیجه گیری..... ۱۰۱
- ۱۰۲-۱۱-۵- پیشنهادات..... ۱۰۲
- ۱۰۳- منابع و مآخذ..... ۱۰۳

فهرست جداول

جدول (۱-۲) اعداد بی بعد	۱۶
جدول (۱-۴) استقلال حل از شبکه	۶۸

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) اتمایزر چرخشی.....	۸
شکل (۲-۱) شماتیک اتمایزر جت فشاری چرخشی ساده.....	۱۰
شکل (۳-۱) اتمایزر جت فشاری جریان برگشتی.....	۱۰
شکل (۴-۱) شماتیک محاسبه قطر قطرات به روش فتوگرافی.....	۱۳
شکل (۱-۲) نوع شکست قطره بر حسب عدد وبر.....	۱۹
شکل (۲-۲) طرحواره ای کلی از تشابه تیلور [13].....	۲۲
شکل (۳-۲) مدل های شکست قطره.....	۳۷
شکل (۴-۲) شماتیک فروپاشی قطره.....	۳۹
شکل (۱-۳) نیروهای وارد بر قطره در جریان هوا [۳۴].....	۵۰
شکل (۲-۳) تغییرات قطره در محیط گازی.....	۵۳
شکل (۳-۳) نیروهای تاثیر گذار بر سرعت قطره.....	۵۹
شکل (۱-۴) هندسه مورد استفاده در تحقیق حاضر.....	۶۷
شکل (۲-۴) نوع شبکه به کار رفته در تحقیق حاضر.....	۶۸
شکل (۳-۴) خطوط جریان و توزیع قطر قطرات.....	۷۱
شکل (۴-۴) کانتور فاز گسسته.....	۷۲
شکل (۵-۴) کانتور چگالی.....	۷۲
شکل (۶-۴) کانتور سرعت.....	۷۳
شکل (۷-۴) بردار سرعت.....	۷۳
شکل (۱-۵) کانتور چگالی.....	۷۶
شکل (۲-۵) کانتور سرعت.....	۷۷
شکل (۳-۵) بردار سرعت.....	۷۷
شکل (۴-۵) خطوط جریان و قطر قطرات.....	۷۸
شکل (۵-۵) نوع شکست بزرگترین قطره.....	۷۹
شکل (۶-۵) کانتور چگالی.....	۸۰
شکل (۷-۵) کانتور سرعت.....	۸۰
شکل (۸-۵) بردار سرعت.....	۸۱
شکل (۹-۵) خطوط جریان و توزیع قطر قطرات.....	۸۱
شکل (۱۰-۵) نوع شکست بزرگترین قطره.....	۸۲
شکل (۱۱-۵) کانتور چگالی.....	۸۲

شکل (۵-۱۲) کانتور سرعت.....	۸۳
شکل (۵-۱۳) بردار سرعت.....	۸۳
شکل (۵-۱۴) خطوط جریان و توزیع قطر قطرات.....	۸۴
شکل (۵-۱۵) نوع شکست بزرگترین قطره.....	۸۴
شکل (۵-۱۶) کانتور چگالی.....	۸۵
شکل (۵-۱۷) کانتور سرعت.....	۸۵
شکل (۵-۱۸) بردار سرعت.....	۸۶
شکل (۵-۱۹) خطوط جریان و قطر قطرات.....	۸۶
شکل (۵-۲۰) نوع شکست بزرگترین قطره.....	۸۷
شکل (۵-۲۱) توزیع سرعت در قطرات.....	۸۸
شکل (۵-۲۲) نوع شکست تزریق بر حسب نمودار رینولدز بر وبر.....	۹۶
شکل (۵-۲۳) شکست لرزشی.....	۹۷
شکل (۵-۲۴) شکست تزریق از نوع غشایی.....	۹۸
شکل (۵-۲۵) توزیع قطرات در شکست تزریق برای (a) متوسط قطر ۵۰ میکرومتر (b) متوسط قطر ۲۰۰ میکرومتر (c) سرعت هوای ۰,۳۸۵ متر بر ثانیه (d) سرعت هوای ۱,۵۴ متر بر ثانیه.....	۹۹
شکل (۵-۲۶) توزیع قطرات در فاصله ۲ متری از نازل (سمت چپ) و ۳ متری از نازل (سمت راست) به ترتیب برای قطر ۶۸ میکرومتر، ۲۷۲ میکرومتر، سرعت هوای ۰,۳۸۵ متر بر ثانیه و ۱,۵۴ متر بر ثانیه.....	۱۰۰

فهرست نمودار

- نمودار (۴-۱) استقلال حل از شبکه..... ۶۹
- نمودار (۵-۱) سرعت قطرات در طول ناحیه حل..... ۸۷
- نمودار (۵-۲) نتایج قطر اولیه بر تبخیر..... ۸۹
- نمودار (۵-۳) عدد وبر بر حسب قطر قطره در ناحیه سرعت قطرات..... ۸۹
- نمودار (۵-۴) عدد رینولدز بر حسب قطر قطره در ناحیه سرعت قطرات..... ۹۰
- نمودار (۵-۵) عدد وبر بر حسب قطر قطره در ناحیه سرعت هوا..... ۹۱
- نمودار (۵-۶) عدد رینولدز بر حسب قطر قطره در ناحیه سرعت هوا..... ۹۱
- نمودار (۵-۷) نتایج تاثیر سرعت هوا بر تبخیر..... ۹۳
- نمودار (۵-۸) عدد وبر بر حسب سرعت هوا در ناحیه سرعت قطرات..... ۹۳
- نمودار (۵-۹) عدد رینولدز بر حسب سرعت هوا در ناحیه سرعت قطرات..... ۹۴
- نمودار (۵-۱۰) عدد وبر بر حسب سرعت هوا در ناحیه سرعت هوا..... ۹۴
- نمودار (۵-۱۱) عدد رینولدز بر حسب سرعت هوا در ناحیه سرعت هوا..... ۹۵
- نمودار (۵-۱۲) رینولدز بر وبر در ناحیه سرعت قطرات..... ۹۶
- نمودار (۵-۱۳) عدد وبر در ناحیه سرعت هوا در حالت های مختلف..... ۹۷

فهرست نمادها

Γ_f	سطح جانبی قطره
Γ_∞	کسر جرمی بخار در محیط
Γ_s	کسر جرمی بخار در سطح قطره
Γ_v	کسر جرمی بخار
ρ	چگالی
ρ_s	چگالی مخلوط گاز و قطرات
ρ_d	چگالی قطره
ρ_f	چگالی سیال
$\bar{p}$	فشار
$\bar{p}_\infty$	فشار محیط
$\bar{p}_d$	فشار قطره
$\bar{p}_\infty^{sat}$	فشار بخار اشباع
τ	زمان
θ	دما
θ_∞	دمای محیط
T_{nr}	دما در موقعیت $\bar{r}$
$\bar{r}$	قطر
$\bar{r}_v$	ضریب انتشار بخار $\bar{r}/\bar{r}_v$
$\bar{r}_V$	انتشار گاز
$\bar{r}_i$	جرم
$\bar{r}_h$	انرژی
$\bar{r}$	نفوذ
$\bar{r}_e$	ترم منبع انرژی
$\bar{r}_m$	ترم منبع جرم
$\bar{r}_i$	ترم منبع گونه ها
$\bar{r}_t$	تکانه
$\bar{r}$	نیرو

$\vec{v}$	نیروی که توسط قطرات به میدان سیال گازی اعمال می شود
$\frac{Q}{V}$	هدایت حرارتی
$\dot{q}_{i,i'}$	نوع انتشار شار
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر
v	سرعت قطره
v	سرعت سیال
Q_{cell}	حجم مش
$\dot{Q}$	جرم قطره
$\frac{\dot{Q}}{V}$	نرخ تبخیر قطره
$\frac{Q}{V}$	وزن مولکولی
Q_A	جرم مولی ماده A
Q_B	جرم مولی ماده B
Q_{AB}	میانگین جرم مولی ماده A و B
Q	شعاع
Q_D	نیروی کشش جریان
Q_A	نیروی جرم اضافی
Q_V	نیروی حجم
Q_S	نیروی بالابر سافمن
Q_M	نیروی بالابر مگنوس
$\emptyset$	ضریب تصحیح
Q	موقعیت شعاع قطره
sh	عدد شروود
Sc	عدد اشمیت
Q	عدد وبر
Q_M	مرکز عدد انتقال جرم پراکنده
Q	عدد رینولدز
Q_D	ضریب درگ
Q_p	ظرفیت حرارتی ویژه
Q	لحظه سکون قطره
Q	نیروی گرانش
Q	هدایت گرمایی گاز

لزجت دینامیکی
 لزجت سینماتیکی
 ثابت 3.14
 سرعت چرخشی قطره
 قطر برخورد
 انتگرال برخورد برای جرم Ω
 رطوبت نسبی φ
 گرمای نهان تبخیر آب
 ضریب میراکنندگی
 ضریب سختی فنر
 طول
 کشش سطحی
 مقیاس زمانی میرایی لزجت قطرات τ
 فرکانس نوسانات سطحی قطره ω
 عدد موج
 طول موج
 نرخ رشد
 طول
 کشش سطحی
 مقیاس زمانی میرایی لزجت قطرات τ
 فرکانس نوسانات سطحی قطره ω

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- تعریف مسئله

اسپری در اکثر فرایندهای متنوع و مهم صنعتی از قبیل احتراق در محفظه احتراق توربینهای گازی و یا در موتورهای احتراق داخلی، خشک کننده ها، سرمایش به کمک تبخیر اسپری، تمیز کننده های سطح اجسام، چاپگرهای جوهر افشان و نظایر آن کاربرد دارد. کاربرد اسپری ها به جنبه های خاصی از زندگی یا صنعت محدود نشده و در شاخه های متفاوتی از قبیل صنایع اتومبیل سازی، هوا فضا، متالورژی، مواد، صنایع شیمیایی، کاغذ سازی، صنایع غذایی، کشاورزی، هواشناسی و فرایندهای تولید توان و نیرو کاربرد چشمگیری دارد.

اتمیزه شدن سیال باعث افزایش سطح موثر سیال تزریقی می شود و به تبع آن انتقال جرم، ممنوم و انرژی بین دو فاز افزایش می یابد. نحوه اتمیزاسیون سیال و رفتار اسپری مستقیماً بر پدیده اختلاط سیال مایع و هوا و به تبع آن بر راندمان اتمیزسیون تأثیر می گذارد. بنابراین شناخت رفتار اسپری از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

در سالهای اخیر به بررسی رفتار اسپری ها به صورت تجربی و یا با استفاده از مدل های ریاضی و حل های عددی توجه بیشتری شده است. جریان اسپری نوعی جریان دو فازی محسوب می شود. معمولاً مدلسازی جریانهای دو فازی به علت پیچیدگی مدلسازی رفتار فصل مشترک دو فاز دیفرانسیل حاکم بر اینگونه جریانها با مشکلات زیادی همراه است. یکی از مشکلات اتمیزه کردن ذرات آب به منظور تولید رطوبت، برخورد قطرات با یکدیگر و تشکیل مجدد مایع می باشد. در تحقیق مورد نظر به دنبال بررسی تأثیر الگوی جریان محیط اطراف بر ذرات اتمیزه شده به منظور بررسی مقدار تبخیر و دستیابی به توزیع رطوبت یکنواخت تری هستیم .

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به اهمیت موضوع تامین رطوبت تحت فشار بالا و جلوگیری از تشکیل ذرات به صورت قطرات مایع در کاربری های تهویه مطبوع و امکان ایجاد جریان ثانویه برای دستیابی به شرایط مطلوب تر لازم است شناخت دقیقتری از رفتار ذرات مایع تحت تأثیر میدان جریان سیال داشته باشیم. از این رو درک صحیح پدیده ی پاشش در افشانه ها و اتفاقی که برای قطرات در حین و بعد از برخورد با هم رخ

می دهد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می باشد. پدیده ای تبخیر قطرات از یک سو به خودی خود دارای ماهیتی پیچیده است و هنوز با وجود مطالعات گسترده ای که در این حوزه انجام گرفته است شناخت کاملی از فیزیک این پدیده در دست نمی باشد. از سوی دیگر، تحلیل های آزمایشگاهی و عددی این پدیده نیز بسیار دشوار و با محدودیت های زیادی روبرو است. به همین علت، تحقیقات در زمینه تبخیر و برخورد قطرات در افشانه ها کماکان از موضوعات و چالش های مطرح در علم مکانیک می باشد.

۱-۳- اهداف تحقیق

در مدلسازی افشانه ها باید به عوامل فیزیکی گوناگونی توجه شده و در مدل های ارائه شده در نظر گرفته شود. از آنجا که پاشش، تعاملی است میان دو فاز (قطرات مایع افشانده شده و محیطی که پاشش به داخل آن صورت می گیرد) نیاز به تحلیل یک جریان دوفازی می باشد قطرات بعد از برخورد به هم، در اثر عوامل مختلف، ممکن است دستخوش اتفاقات گوناگونی، که با عنوان رژیم های برخورد شناخته می شوند، گردند. این رژیم ها در تعیین مشخصات قطرات بعد از برخورد به هم موثرند. از این رو در مدلسازی افشانه ها باید توجه ویژه ای به این مورد شود. حاصل تحقیق حاضر، مقایسه توزیع سرعت هوا و قطر متوسط قطرات در مقطع طولی و شعاعی محفظه، میباشد.

۱-۴- روش انجام تحقیق

در پروژه حاصل بعد از جمع آوری اطلاعات، منابع و بررسی پیشینه ی تحقیق در رابطه با شرایط های مختلف ذرات تحت اسپری به پارامترهای موثر در تبخیر و توزیع قطرات پرداخته می شود تا بتوان شرایط مناسبی برای تبخیر ذرات ایجاد کرد.

۱-۵- ساختار پایان نامه

پایان نامه پیش‌رو در پنج فصل تنظیم شده است که خلاصه مطالب ذکر شده در هر فصل به صورت زیر می‌باشند:

فصل اول: معرفی پیشینه کارهای صورت گرفته و تعریف اسپری های مختلف

فصل دوم: بررسی عوامل مختلف در شکست و فروپاشی قطره

فصل سوم: معرفی معادلات ریاضی مربوط به فاز گسسته و پیوسته

فصل چهارم: تعریف مسئله، صحت سنجی و بررسی نتایج شبیه سازی حاصل از مقاله مبنا

فصل پنجم: بررسی نتایج حاصل از ۴ شبیه سازی صورت گرفته در شرایط های مختلف و پیشنهادات

۱-۶- پیشینه تحقیق

یکی از اولین تحقیقات صورت گرفته برای تبخیر قطره توسط اسپالدینگ در سال ۱۹۵۳ انجام شد [۱]. نتیجه پژوهش وی، ارائه مدلی بر اساس قانون کلاسیک مربع قطر می باشد. او این مدل را با فرض ثابت بودن دما و سرعت هوای محیط برای یک قطره به دست آورد و رابطه ای برای میزان شار جرمی ارائه داد. همزمان با او گودسیو نیز نتایج مشابهی به دست آورد [۲]. پس از آنها کرو و همکاران در سال ۱۹۷۷، با فرض غیرقابل حل بودن مایع در گاز، مدلی تحت عنوان، مدل مقایسه ای انتقال جرم-حرارت ارائه نمود، که مستقیماً با استفاده از شرط مرزی کسر جرمی بخار سیال در سطح قطره بدست می آید [۳]. زمانی که نرخ تبخیر افزایش می یابد، نتایج روش های تعادلی اختلاف زیادی با نتایج تجربی نشان می دهند، اولین بار بلان و سومرفیلد در سال ۱۹۷۸، در مدل سازی تبخیر قطره متوجه اهمیت فرایندهای غیر تعادلی در اندازه قطرات متداول در حدود ۰,۵ میلی متر در کاربردهای صنعتی شدند و قانون تبخیر غیرتعادلی لانگمویر- نارسن را برای استفاده در تبخیر قطرات معرفی کردند [۴]. جکسون و داویدسون در سال ۱۹۸۳، برای قطرات بسیار ریز که در طی فرایند میعان و

فرایند هسته ای بوجود می آیند، قانون غیرتعادلی هرز - نادن ، که در ناحیه مولکول های آزاد، یعنی جایی که مسافت طی شده توسط مولکول های گاز در فضای آزاد بسیار بزرگتر از ضخامت فیلم گاز فشرده است، کاربرد دارد، را در مدل جریان مایع-گاز خود وارد کردند[۵]. آگاروال و همکاران در سال ۱۹۸۴، مدل های مختلف تبخیر را برای استفاده در شبیه سازی لاگرانژی اسپری، بکار بردند[۶]. آنها استفاده از یک مدل متقارن کروی با ضریب هدایت محدود برای مایع در حالت ایستا و یک مدل متقارن محوری برای جریان داخل قطره برای حالتی که عدد رینولدز قطره بزرگتر از یک می باشد را ارائه دادند. متأسفانه هیچ یک از این دو مدل برای شبیه سازی سیستم هایی که دارای تعداد زیادی قطره هستند مناسب نمی باشند. علت این امر، هزینه بالای محاسبات مورد نیاز برای تحلیل جریان داخلی و لایه مرزی خارجی روی سطح قطره می باشد. سیرینگانو در سال ۱۹۹۳، با صرف نظر کردن از میدان جریان پیچیده به بررسی و مدل سازی معادلات اندازه حرکت، انتقال حرارت و انتقال جرم یک قطره پرداخت[۷]. معادلات بدست آمده توسط او در روشهای مختلفی مانند مدل سازی مستقیم عددی و یا در مدل سازی های اسپری در حالت آشسته که بر اثر حرکت قطرات در داخل فاز گاز ایجاد می شود، نیز استفاده شد. در سال ۱۹۹۵، آگاروال و همکاران به بررسی مجدد مدل های تبخیر و معادلات دینامیک قطره پرداخته و ضرایب تصحیحی برای تبخیر و معادلات دینامیکی قطره در شرایطی که عدد رینولدز بزرگتر از ۱۰۰ باشد، ارائه دادند و سپس نتایج حل عددی خود را با نتایج تجربی مقایسه کردند[۸]. میلر و همکاران در سال ۱۹۹۸ به بررسی مدل های مختلف تبخیر به منظور استفاده در شبیه سازی های مدرن جریان های دو فازی در فشار کم پرداختند[۹]. دوشین و همکاران در سال ۲۰۰۸ شبیه سازی ریاضی تبخیر غیرتعادلی قطره را انجام دادند، آنها نشان دادند که مدل های غیرتعادلی مراحل پایانی تبخیر را بهتر از مدل های تعادلی پیش بینی میکنند[۱۰].

۷-۱- مقدمه ای بر جریان های چند فاز

جریان های چند فاز^۱ به جریان های گفته میشود که حداقل دو فاز مختلف در آن حضور داشته باشند. این دو فاز ممکن است همچون دو فاز آب و بخار از یک جنس باشند یا همچون دوفازی آب و هوا از دو جنس متفاوت باشند. در دوفازی سیال جامد، سیال می تواند مایع یا گاز باشد. تقریباً میتوان اکثر پدیده های فیزیکی را در دسته بندی جریان دو فاز قرار داد. از مثال های رایج جریان دو فاز سیال- جامد می توان به حرکت ذرات ته نشین^۲ و رسوب در لوله ها اشاره کرد. ستون حباب^۳، حرکت گاز و سیال در لوله ها یا پدیده های طبیعی همچون بارش باران از پدیده های رایج جریان دو فاز سیال- گاز- مایع می باشد. جریان اسپری قطرات یا پودر کردن سیال مایع نیز در زیر گروه جریان های دوفازی مایع - گاز قرار می گیرد.

۸-۱- روشهای پودر کردن (افشان کردن) سیال

۸-۱-۱- مقدمه

استفاده از اتمایزرها روشی است برای تولید پودر خشک یک سیال می باشد. اتمایزرها در صنایع مختلفی از جمله صنایع غذایی و دارویی کاربرد دارند. محصولات نهایی در فرآیندهای صنعتی را میتوان با استفاده از اتمایزرها به شکل، رطوبت و اندازه تبدیل کرد. گونه ای از اتمایزرها قابلیت استفاده در آزمایشگاه صنایع غذایی را دارند به همین دلیل حجم و ظرفیت کمتری نسبت به انواع دیگر اتمایزرها دارند. گونه ی دیگر از لحاظ حجم و ظرفیت در ساینز بزرگتری ساخته می شوند و قابلیت استفاده در صنایع سرامیک و مواد جامد دیگری را نیز دارد. تمام اتمایزرها از نوعی از اسپری

^۱ Multiphase flow

^۲ Residue

^۳ Blob

کردن یا اسپری نزولی استفاده می کنند تا مایع را به یک اسپری با اندازه تعیین شده برسانند. پر کاربردترین آنها دیسک های چرخشی با سرعت بالا و تک سیاله می باشند. به این ترتیب برای برخی از کاربردها از دو نوع ورودی استفاده می شود. با توجه به موارد مورد نیاز در یک فرآیند، می توان اتمایزرها را با اندازه های ۱۰ الی ۵۰۰ میکرومتر را استفاده کرد. اکثر اسپری اتمایزرهای که استفاده می شود، با اندازه های ۴۰ الی ۱۵۰ میکرو متر می باشد.

فرایند پودر شدن می تواند به روشهای زیادی صورت بگیرد. روشها معمولاً بر طبق منبع انرژی مورد استفاده به صورت زیر دسته بندی می شوند :

۱. عبور دادن مایع در فشار بالا از طریق یک اوریفیس مانند اتمایزرهای جت فشار
 ۲. عبور دادن جریان گاز سرعت بالا روی سطح مایع به طوریکه امواج ایجاد شده به داخل فیلمهای نازک نفوذ می کند مانند اتمایزرهای سیال دوگانه
 ۳. برخورد جت مایع به جت مایع دیگر
 ۴. با استفاده از نیروهای گریز از مرکز مانند اتمایزرهای چرخشی (فنجان گردنده)
 ۵. با استفاده از امواج مافوق صوت که در سراسر مایع منتشر می شود.
- بعضی از روشها می توانند به صورت ترکیبی از این تکنیکها مورد استفاده قرار بگیرند مانند اتمایزرهای ترکیبی^۱
- حال به معرفی چند نوع از این اتمایزرها می پردازیم :

۱-۸-۲- اتمایزر چرخشی

در اتمایزرهای چرخشی سیال وارد یک سطح چرخنده می شود و مایع تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز اتمیزه می شود. سیال به واسطه یک لوله به مرکز یک دیسک سوراخ دار و یا به سطح داخلی یک فنجان تو خالی که در حال چرخش است وارد می شود. اتمایزر چرخشی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

^۱ Combined atomizer



شکل (۱-۱) اتمایزر چرخشی

اتمایزر دیسک سوراخ دار به طور وسیعی برای اهداف تحقیقی با کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می گیرد و بیشتر مطالعات در رابطه با مکانیزم تشکیل قطره با این اتمایزر انجام شده است. مکانیزم تشکیل قطره بدین صورت است که از سوراخ مرکز دیسک یک لایه از مایع روی سطح دیسک تشکیل می شود و این لایه در لبه دیسک به صورت یک برآمدگی در می آید و سپس این برآمدگی به صورت قطرات شکسته می شود. ماهیت برآمدگی های ایجاد شده بستگی به میزان جریان و سرعت گردش دارد. به دلیل ماهیت مکانیزم شکست، قطرات عمدتاً یک اندازه هستند ولی تعداد کمی از ذرات با قطر کوچکتر نیز تشکیل می شوند. اتمایزرهای چرخشی از نوع فنجان‌ی کاربرد تجاری وسیعی در احتراق سوخت دارند. فنجان در سرعت بالا توسط یک موتور الکتریکی یا بوسیله یک توربین هوا به گردش در می آید. جریان هوا طوری جهت داده می شود که اتمایزر عملاً شبیه یک اتمایزر سیال دوگانه رفتار می کند زیرا در آن فنجان با سوخت برخورد می کند و پودر شدن سوخت کامل می شود. در اتمایزرهای گردشی اندازه قطرات به ویسکوزیته سیال زیاد حساس نیست.

۱-۸-۳- اتمایزرهای جت فشاری

در سال ۱۹۰۲ این روش توسعه یافت، مکانیزم عملکرد آن براساس عبور دادن سیال از طریق یک اوریفیس تحت فشار برای تشکیل جت ناپایدار با سرعت بالا می باشد، که پس از ترک اوریفیس جت تجزیه می شود.

یک از ویژگی مهم اتمایزهای تحت فشار این است که شدت جریان در آن ها متناسب با ریشه دوم فشار است.

$$\frac{\text{flow rate}}{(\frac{\text{flow rate}}{\text{flow rate}})^5} = \frac{\text{flow rate}}{\text{flow rate}} \quad (2 \quad 2)$$

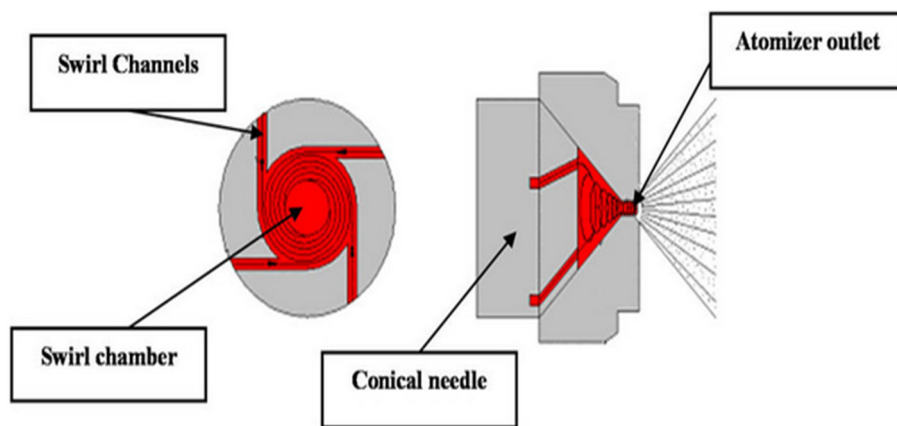
که عدد جریان مشخصه هر اتمایزر فشاری است.

از آنجایی که فشار بحرانی معینی باید قبل از وقوع فرآیند پودر شدن ایجاد شود این امر شدت جریان حاکم را که اتمایزر می تواند به خوبی جابجا کند، محدود می کند (کمترین مقدار سوخت که باید جابجا شود محدود می شود). این پدیده نسبت ماکزیمم به مینیمم جریان سوخت اتمایزر را کنترل می کنند. حد بالائی مصرف توسط سیستم تأمین سیال محدود می شود. بررسی پدیده turn down در مورد نازلهای جت فشار امری ضروری است. در اتمایزرهای جت فشار محدودیت فشار وجود دارد به این معنی که برای ایجاد قطرات ریز، فشار از یک حد مجاز نباید کمتر شود (فشار بحرانی)، از طرفی پودر کردن سیال در زمانهای مختلف به علت تغییرات بار سیستم تفاوت دارد و برای کاهش شدت جریان سیال باید فشار کاهش یابد و چون مجاز به کاهش فشار از یک حد معین نخواهیم بود، لذا حد پایین فشار محدود می شود.

نازلهای جت فشار به دو گروه تقسیم می شوند:

۱-۳-۸-۱- اتمایزرهای جت فشاری چرخشی ساده

این نوع نازل که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. سوخت با یک حرکت چرخشی از طریق شیارهای شیب دار به داخل اتاق چرخنده هدایت می شود و در آنجا سیال که با سرعت بالا می چرخد به صورت اسپری از آن خارج می شود.



شکل (۲-۱) شماتیک اتمایزر جت فشاری چرخشی ساده

۱-۸-۳-۲- اتمایزرهای جریان برگشتی

در توربینهای گازی محدوده ماکزیمم به مینیمم می تواند با استفاده از اتمایزرهایی که دارای سیستم سیال (سوخت) رسانی اصلی و کمکی هستند بدست آید، و هر کدام از تغذیه کننده ها دارای دو اوریفیس مستقل هستند که یکی کوچکتر است. اوریفیس کوچکتر جریان کمتر و اوریفیس بزرگتر جریان بیشتری را در فشارهای بالاتر جابجا می کنند. و یک نمونه از آنها در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. به طور کلی اتمایزرهای جت فشار در رنج وسیعی از نظر ظرفیت در دسترس هستند.



شکل (۳-۱) اتمایزر جت فشاری جریان برگشتی

۱-۸-۴- اتمایزهای جت برخوردی

این نوع که در موتور راکت‌های سوخت مایع به طور وسیع بکار می‌رود، نوعی جت مخصوص یا اتمایزر جت فشاری است که در آن جت مایع باعث اتمیزه شدن می‌شود. در این نوع از اتمایزرها میتوان از دو سیال هم نوع (مایع-مایع) یا از دو سیال غیر هم نوع (مایع-گاز) استفاده کرد. این نوع اتمایزر در بعضی موارد قطرات کوچکتر از اتمایزر جت فشار تولید می‌کند و در بعضی موارد قطرات بزرگتر از اتمایزر جت فشار تولید می‌کند.

۱-۹-۲- روش‌های تعیین اندازه ی قطره

۱-۹-۱- مقدمه

از نظر علمی توانایی تعیین اندازه قطرات در یک اسپری به روش تجربی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. باید توجه داشت که توزیع اندازه قطرات در یک اسپری با فاصله از نازل تغییر می‌کند، زیرا شتاب (کاهش سرعت) هر قطره تابع معکوسی از قطر قطره است. بنابراین طیف اندازه قطرات یک اسپری با تغییر فاصله از نازل تغییر می‌کند. بعلاوه برخورد قطره با قطره در اکثر اسپری‌ها اجتناب ناپذیر میباشد. عمده ترین تکنیک‌های اندازه گیری مورد استفاده در ذیل شرح داده شده.

۱-۹-۲- روش شمارش پالس

این روش یک روش اندازه گیری مستقیم اندازه قطرات و توزیع آنها در اسپری با استفاده از شمارش مستقیم می‌باشد. این کار با استفاده از لوله ای که در داخل محیط اسپری قرار داده شده است انجام می‌شود. در این روش، طیف اندازه قطره را حین عبور قطرات از بین دو سوزنی که در یک فاصله

دقیق از هم قرار گرفته اند و ذرات در حین عبور از دو سر سوزن ایجاد یک مدار الکتریکی می کنند اندازه گیری می کنند. این روش به تکنیک اندازه گیری سریع^۱ معروف است. با تغییر دادن فاصله سوزنها، اندازه و تعداد قطرات در هر طیف به دست می آید. در این روش باید از یک مایع هادی استفاده شود.

۱۰-۱- روش واکس^۲ و قطره منجمد^۳

در تکنیک قطره منجمد، اسپری مستقیم به داخل یک محیط الکلی که در دمای یخ خشک نگهداری می شود تزریق شده و یا از روی آن عبور می کند. همچنین اسپری می تواند به داخل نیتروژن مایع پاشیده شود. ذرات منجمدی که به این روش تولید می شود می تواند به سادگی به وسیله غربال و یا بوسیله فتوگرافی از ذرات و شمارش آنها اندازه گیری شوند. در استفاده از روش واکس، پارافین ذوب شده در درجه حرارت مناسب به نازل پمپ شده و سپس به داخل آب پاشیده می شود. پاشش واکس پارافین ذوب شده به داخل آب که در دمای کمتر از آن قرار دارد باعث منجمد شدن ذرات اسپری می شود. سپس ذرات واکس جمع آوری و بوسیله عبور آنها از یک سری غربالهای اندازه گیری مدرج، اندازه گیری می شوند. همچنین روش واکس میتواند در درجه حرارت بالاتر از نقطه ذوب شبیه سوختههای مایع به کار گرفته شود.

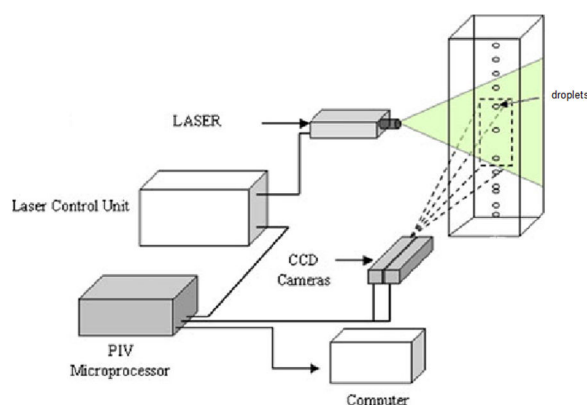
^۱ Quick measurement technique

^۱ wax method

^۲ frozen drop

۱-۱-۱- روش فتوگرافی^۱

یک روش مناسب اندازه گیری قطرات در خود اسپری فتوگرافی مستقیم میباشد. این تکنیک بسیار ارزشمند است زیرا نیاز به جمع آوری و غربال قطرات ندارد. سیستم شامل یک منبع نوری جهت نورپردازی و یک دوربین عکسبرداری است، که ترتیب قرار گرفتن آنها در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. در استفاده از این تکنیک باید دقت زیادی صورت بگیرد تا در توزیع اندازه بدست آمده اشتباه نشود.



شکل (۴-۱) شماتیک محاسبه قطر قطرات به روش فتوگرافی

^۳ photography

فصل ۲:

شکست و فروپاشی قطره

۱-۲- اعداد بی بعد

طیف گسترده ای از خواص مواد و پدیده های فیزیکی روی روند فروپاشی قطرات تأثیر می گذارد. در مورد سقوط آزاد یک قطره ، شتاب به دلیل جاذبه ، حرکت ، کشش سطح بین فازها ، ویسکوزیته و گاهی تراکم فاز ساکن از مهمترین پارامترهای بررسی تغییرات قطره می باشد. با توجه به این پارامترها، گروه های بدون بعد مختلف حاکم بر رفتار قطره ، توسط محققان ارائه شده است. لیستی از اعداد مهم بدون بعد را می توان در جدول زیر یافت. بسته به شرایط ، بعضی از اعداد ذکر شده در جدول زیر برای استفاده شایعتر هستند در شرایط نزول قطرات مایع ، استفاده از رینولدز و وبر برای طبقه بندی رفتار قطرات به دلیل سرعت وابسته به زمان قطرات و همچنین وجود شکست توصیه نمی شود.

جدول (۱-۲) اعداد بی بعد

Eötvös number	Eo	$\frac{g(\rho_d - \rho_c)D^2}{\sigma}$
Ohnesorge number (based on droplet properties)	Oh_d	$\frac{\mu_d}{(\rho_d D \sigma)^{1/2}}$
Ohnesorge number (based on continuous phase properties)	Oh_c	$\frac{\mu_c}{(\rho_c D \sigma)^{1/2}}$
Weber number	We	$\frac{\rho_c D v^2}{\sigma}$
Reynolds number	Re	$\frac{\rho_c D v}{\mu_c}$
Viscosity ratio	μ^*	$\frac{\mu_d}{\mu_c}$
Density ratio	ρ^*	$\frac{\rho_d}{\rho_c}$

۲-۲- شکست اولیه

یکی از عوامل مؤثر بر شناخت رفتار اسپری شکست اولیه^۱ می باشد، فرایندی که در نتیجه ی آن مایع پاشیده شده به قطرات زیادی تبدیل می شود. علیرغم اهمیت این فرایند، مکانیزمهای شکست

^۱ Primary break-up

مایع به علت مشکل بودن تشخیص اندازه قطرات در نزدیکی نازل، به دلیل پیوسته بودن مایع اسپری در آن حوالی، هنوز به خوبی شناخته نشده اند. داده های تجربی نیز که به روش اپتیکی در این محل بدست آمده اند معرفهای خوبی برای شناخت اسپری نبوده اند. برای مثال حتی در تزریق در فشار ثابت از میان یک نازل تک سوراخ به درون گاز با چگالی بالا، که یک مورد نسبتاً ساده در اسپری کردن سیال می باشد، این مکانیزم به خوبی شناخته نشده است. در واقع تراکم قطرات، تشخیص جزئیات شکست را دشوار کرده و موجب پیچیدگی اندازه گیری ها می شود. که این امر شناخت در این ناحیه را مشکل می کند. اما خوشبختانه تکنیک های محاسباتی به منظور کمک به مشخص نمودن اسپری ها در دسترس هستند. فرایند شکست اولیه، شرایط ابتدایی و اولیه را برای محاسبه فرآیندهای بعدی تشکیل مخلوط فراهم می سازد. اهمیت مدل شکست اولیه در تعیین شرایط اولیه قطرات، از جمله شعاع اولیه و مؤلفه های سرعت اولیه (زاویه اسپری) است که عمدتاً از وضعیت جریان داخل سوراخ های نازل تأثیر می گیرند. تعداد اندکی مدل دقیق و همراه با جزئیات برای شبیه سازی شکست اولیه اسپری های پرفشار وجود دارد. یک دلیل آن پیچیدگی بسیار زیاد انجام بررسی های تجربی به خاطر چگالی بالای اسپری و کوچکی ابعاد می باشد. بنابراین درک فرآیندهای مورد نظر و تحلیل مدل های شکست اولیه مشکل می باشد. در حال حاضر امکان شبیه سازی جریان داخل انژکتورهای پرفشار وجود دارد، اما بدلیل توصیفات مختلف ریاضیاتی از فاز مایع داخلی (توصیف اویلری) و خارجی نازل (توصیف لاگرانژی)، این امکان وجود ندارد که شکست اولیه مستقیماً تحلیل و محاسبه شود و بایستی از مدل سازی استفاده کنیم. گونه های مختلفی از مدل های شکست وجود دارد که در مورد عملکرد مکانیزم های مربوطه مانند عامل آئرو دینامیکی، کاویتاسیون و آشفستگی، بحث کرده اند. مدل های ساده تر، داده های ورودی کمتری نیاز دارند اما فرضیات بیشتری در این مدل ها استفاده می شود و نتایج این مدل ها درباره پیش بینی ساختار و وضعیت آغازین اسپری در نزدیکی نازل از کیفیت و دقت کمتری برخوردار است. به عبارت دیگر مزیت مدل های ساده تر این است که محدوده کاربرد آنها بدلیل راحتی آنها گسترده تر است. بعلاوه اینکه مدلهای با جزئیات زیاد معمولاً به یک شبیه

سازی کامل CFD از جریان انژکتور و اطلاعات ورودی بسیار کامل نیاز دارند. اما امروزه نتایج این مدل های پیچیده با وجود صرف زمان زیاد برای محاسبات، شبیه سازی دقیق و مطمئنی را از فرآیند شکست اولیه و تأثیر آن بر اسپری و تشکیل مخلوط، در اختیار ما قرار می دهند. لازم به ذکر است که تمامی مدل ها، زمینه کاربردی مخصوص به خود را دارند. با توجه به اطلاعات ورودی قابل دسترس، زمان محاسباتی و در نظر گرفتن شرایط خاص، از میان مدل ها ی موجود بایستی مدل مناسب انتخاب شود

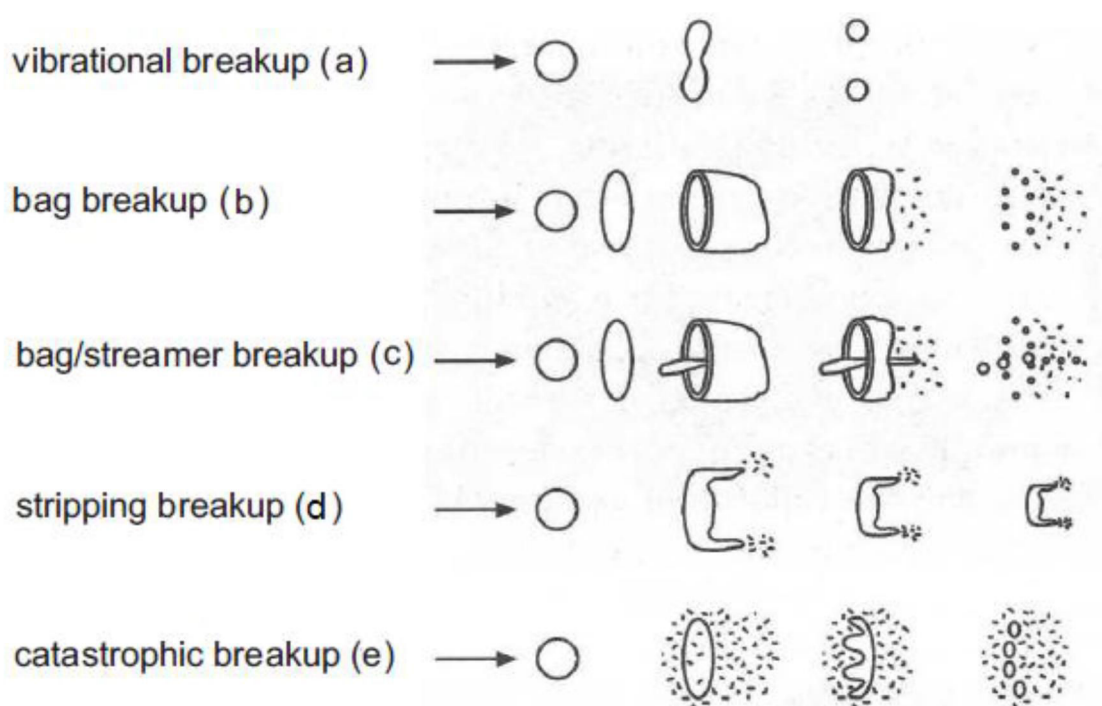
۲-۳- شکست ثانویه

شکست ثانویه بیانگر فرآیند تجزیه و فروپاشی قطرات موجود به قطرات کوچکتر، به دلیل نیروهای آئرویدینامیکی ایجاد شده توسط سرعت نسبی بین قطرات و گاز محیطی می باشد. وقتی یک قطره یا ذره در سیال فاز پیوسته حرکت میکند نیروهای متفاوتی بر آن وارد میشود. یکی از این نیروها از نیروهای درگ (Drag) که از ، سرعت نسبی قطره و سیال فاز پیوسته ناشی میشوند؛ است. اما نیروهای دیگری نیز بر قطره وارد میشوند که به دلیل وجود شتاب نسبی بین قطره و سیال فاز پیوسته به وجود می آیند، این نیروها به نیروهای گذرا معروفاند. با فرض صفر بودن شتاب نسبی (Basset) ، مانند نیروهای باست بین قطره و سیال فاز پیوسته میتوان از نیروهای گذرا صرفنظر کرد. این فرض در اغلب جریانهای دوفازی پراکنده فرض قابل قبولی است. اعمال نیروهای پسای ایرودینامیکی اعم از فشاری و اصطکاکی باعث ایجاد تنش بر فصل مشترک قطره با محیط اطرافش میشود. نیروهای کشش سطحی با تنشهای ایجاد شده در فصل مشترک مقابله میکنند اما اگر تنشهای وارد شده بر جداره قطره از حد معینی تجاوز کنند، نیروهای کشش سطحی یارای مقابله ندارند و قطره خواهد شکست. شکست قطره به شدت به عدد وبر جریان بستگی دارد ، عدد وبر بیانگر نسبت نیروهای هیدرودینامیکی متلاشی کننده قطره به نیروهای پایدارکننده است که به صورت زیر توصیف می شود.

$$\text{We} = \frac{\rho_g \rho_{rl} \text{We}}{\rho} \quad (1-2)$$

در معادله فوق ρ قطره قطره ، ρ_{rl} سرعت نسبی ، ρ_g چگالی گاز و کشش سطحی بین مایع و گاز می باشد.

با توجه به آزمایش های صورت گرفته مشخص گردید که بر اساس مقدار عدد وبر فرآیند های شکست مختلفی به وجود می آید که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) نوع شکست قطره بر حسب عدد وبر

نوع شکست بر حسب عدد وبر به صورت زیر دسته بندی می شود:

$$\text{شکست لرزشی} \Leftarrow \text{We} \leq 12 \quad (1)$$

$$\text{شکست کیسه ای} \Leftarrow 12 < \text{We} \leq 50 \quad (2)$$

$$\text{شکست کیسه ای-پرچمی} \Leftarrow 50 < \text{We} \leq 100 \quad (3)$$

$$\text{شکست ورقه ای} \Leftarrow 100 < \text{We} \leq 350 \quad (4)$$

(۵) $350 > \text{Re} \Leftarrow$ شکست تخریبی

شکست لرزشی در اعداد وبر کوچک اتفاق می افتد. در این حالت تغییر شکل قطرات باعث شکست کامل نمی شود. در شکست کیسه ای جریان گاز خارج از قطره، به مرکز آن راه می یابد. این عامل باعث اختلاف فشار بین مرکز قطره و محیط اطراف شده و با افزایش سرعت نسبی، نیروی اینرسی بر نیروی کشش سطحی غلبه نموده و در نتیجه منجر به شکست قطره می گردد. در شکست کیسه-پرچمی نیز یک جت کوچک سیال ظاهر شده که باعث کوچکتر شدن قطرات می شود. در روش شکست ورقه ای، قطر قطره به تدریج کاهش می یابد، زیرا قطرات خیلی کوچک به علت نیروهای برشی، به طور پیوسته جدا می شوند. در این روش نیروهای آئرو دینامیکی بر نیروی کشش سطحی غلبه نموده و قطرات از گوشه به سمت مرکز، برهنه می شوند. شکست تخریبی به دلیل کاهش شدید سرعت، نوسانات قطرات با دامنه و طول موج بزرگ باعث فروپاشی شده و قطرات بزرگ تولید می شوند در همین هنگام موجهای سطحی با طول موج کوتاه قطرات کوچک را بوجود می آورند.

۲-۴- محاسبه عدد وبر بحرانی بر مبنای مدل تشابهی تیلور

عدد وبر بحرانی نشانگر رشد ناپایداری هیدرو دینامیکی و آستانه شکست قطره است. عدد وبر بحرانی متغیر بسیار مهمی در برآورد اندازه قطرات و رفتار فصل مشترک دو فاز در محاسبات جریان های چند فازی پراکنده است. معمولاً تبادل انرژی و تکانه بین دو فاز با مقدار عدد وبر بحرانی ارتباط مستقیم دارد. تحلیل های ابعادی حاکی از آن است که سه متغیر بی بعد بر عدد وبر بحرانی مؤثر اند: عدد رینولدز، عدد اونسورگ^۱ و نسبت چگالی دو فاز. تأثیر دو متغیر اول یعنی عدد رینولدز و عدد اونسورگ

^۱ Ohnesorge number

بر عدد وبر بحرانی توسط محققان زیادی از جمله پیلچ^۱ و اردمن^۲، کلو^۳ و گلفاند^۴ بررسی شده است. میزان تأثیر نسبت چگالی دو فاز بر عدد وبر بحرانی نیز در سال ۲۰۰۳ میلادی توسط کوشیزوکا و همکارانش با استفاده از مدلسازی فرایند شکست قطره با روش نیمه ضمنی ذرات متحرک (MPS) بررسی شد [۱۱]. آنها نشان دادند که در جریان هایی با نسبت چگالی بسیار کوچک، مقدار عدد وبر بحرانی به شدت به نسبت چگالی دو فاز وابسته است. کوشیزوکا و همکارانش محاسبات خود را برای نسبت چگالی ۱ تا ۹ انجام دادند.

مدل شکست تشابهی تیلور^۵ (TAB) توسط اوروکه و آمسدن در سال ۱۹۸۷ بیان شد [۱۲]. مدل TAB یک مدل مرسوم برای محاسبات شکست قطرات است که امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی از جمله مدلسازی شکست قطرات اسپری استفاده می شود. در این مدل فرض بر این است که رفتار نهایی قطره در داخل سیال احاطه کننده آن کاملاً مشابه رفتار ارتعاش اجباری یک نوسانگر همساز دارای میراکننده است. نوسان و واپیچش قطرات نیز توسط این مدل قابل بیان است. معادله حاکم بر حرکت ارتعاش اجباری یک سیستم نوسانگر همساز دارای میرا کننده به صورت زیر است؛

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F \cos(\omega t) \quad (2-2)$$

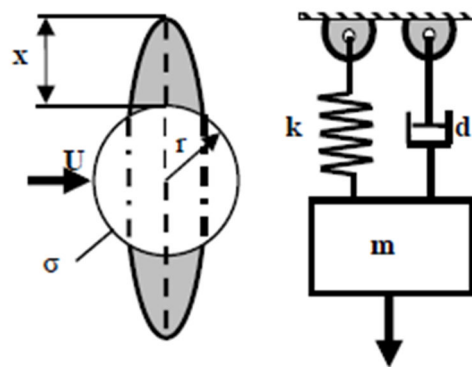
^۲ Pilch

^۳ Erdman

^۴ Kolev

^۵ Gelfand

^۱ Taylor Analogy Breakup



شکل (۲-۲) طرحواره ای کلی از تشابه تیلور [13]

بر طبق مدل TAB برای بیان رفتار ارتعاشی و واپیچشی قطره متحرک در یک محیط سیال نیز می توان همین معادله را نوشت. اگر x را میزان تغییر شکل قطره از حالت کروی در نظر بگیریم، از تشابه تیلور ضرایب معادله برای قطره نوسانی واپیچشی به صورت زیر به دست می آیند:

$$\frac{\rho}{\rho_f} = \frac{\rho_g \rho^2}{\rho_f \rho_l \rho} \quad (۳-۲)$$

$$\frac{\rho}{\rho} = \frac{\rho_k}{\rho_l \rho^3} \quad (۴-۲)$$

$$\frac{\rho}{\rho} = \frac{\rho_d}{\rho_l \rho^2} \quad (۵-۲)$$

در این مدل فرض بر این است که زمانی شکست قطره رخ میدهد که تغییر شکل آن از یک حد بحرانی فراتر برود به عبارت دیگر:

$$\rho > \rho_b \rho \quad (۶-۲)$$

که ρ_b عدد ثابت است و معمولاً برابر ۰/۵ در نظر گرفته می شود. اگر فرض شود که شکست زمانی رخ میدهد که تغییر شکل قطره برابر شعاع آن باشد، در این حالت قطب های شمال و جنوب قطره در مرکز آن به هم می رسند. این فرض به طور ضمنی بیانگر این حقیقت است که قطره دستخوش یک

مد ارتعاشی غالب شده است. با جایگذاری روابط (۲-۳) (۲-۴) (۲-۵) در (۲-۲) و با فرض $\frac{x}{c_b r} = 1$ خواهیم داشت:

$$\ddot{x} = \frac{\ddot{x}_F \ddot{x}_g \ddot{x}_{rel}^2}{\ddot{x}_b \ddot{x}_l \ddot{x}^2} - \frac{\ddot{x}_k \ddot{x}}{\ddot{x}_l \ddot{x}^3} - \frac{\ddot{x}_d \ddot{x}_l}{\ddot{x}_l \ddot{x}^2} \ddot{x} \quad (۷-۲)$$

در این حالت شکست زمانی رخ میدهد که $\ddot{x} > 1$ باشد. از حل معادلات بالا برای زیر میرا و با فرض ثابت بودن سرعت نسبی داریم:

$$\ddot{x}(\ddot{x}) = \ddot{x}_c + \ddot{x}^{-\frac{t}{\tau}} \left[(\ddot{x}_0 - \ddot{x}_c) \cos \ddot{x} + \frac{1}{\ddot{x}} \left(\ddot{x}_0 + \frac{\ddot{x}_0 - \ddot{x}}{\ddot{x}_z} \right) \sin \ddot{x} \right] \quad (۸-۲)$$

$$\ddot{x}_c = \frac{\ddot{x}_F \ddot{x}}{\ddot{x}_k \ddot{x}_b} \frac{1}{2} \quad (۹-۲)$$

$$\ddot{x} = \frac{\ddot{x}_g \ddot{x}_{rel}^2 \ddot{x}}{\ddot{x}} \quad (۱۰-۲)$$

$$\ddot{x}_0 = \ddot{x}_0 = 0 \quad (۱۱-۲)$$

$$\frac{1}{\ddot{x}} = \frac{\ddot{x}_d}{2} \frac{\ddot{x}_l}{\ddot{x}_l \ddot{x}^2} \quad (۱۲-۲)$$

$$\ddot{x}^2 = \ddot{x}_k \frac{\ddot{x}}{\ddot{x}_l \ddot{x}^3} - \frac{1}{\ddot{x}^2} \quad (۱۳-۲)$$

از مقایسه با نتایج تجربی مقادیر $\ddot{x}_F$ ، $\ddot{x}_d$ و $\ddot{x}_k$ به صورت زیر بدست می آید:

$$\ddot{x}_F = \frac{1}{3} \quad (۱۴-۲)$$

$$\ddot{x}_d = 0/5 \quad (۱۵-۲)$$

$$\ddot{x}_k = 0/8 \quad (۱۶-۲)$$

معادله (۸-۲) دارای مودهای ارتعاشی متفاوتی است. طبق مدل TAB اگر قطره دچار شکست شود این شکست در مود ارتعاش اصلی یا همان هارمونیک اول رخ خواهد داد. بنابراین اگر دامنه نوسانات بی بعد (y) در سطح قطره در مود ارتعاش اصلی به مقدار یک برسد ($y=1$)، قطره در آستانه شکست قرار خواهد گرفت. در چنین شرایطی عدد وبر جریان برابر با عدد وبر بحرانی خواهد بود. برای محاسبه عدد وبر بحرانی قبل از هر چیز لازم است مقیاس زمانی متناظر با مود ارتعاش اصلی (f_{fund}) محاسبه شود. این مقیاس زمانی متناظر با اولین بیشینه نسبی پاسخ دینامیکی قطره است. به عبارت دیگر (f_{fund}) اولین ریشه غیر صفر معادله $\vartheta(\vartheta) = 0$ است. با مشتق گیری از رابطه (۸-۲) داریم:

$$\vartheta(\vartheta) = \frac{\vartheta_F}{\vartheta_k \vartheta_b} \vartheta_g \left(\vartheta + \frac{1}{\vartheta^2 \vartheta} \right) \left(\vartheta^{-\frac{t}{\tau}} \sin \vartheta \right) = 0 \quad (۱۷-۲)$$

در معادله بالا به غیر از $\sin \vartheta$ سایر جملات نمی توانند صفر باشند لذا داریم:

$$\sin \vartheta = 0 \quad (۱۸-۲)$$

بنابراین:

$$\vartheta = \frac{\vartheta}{\vartheta} \quad (۱۹-۲)$$

f_{fund} به ازاء $k=1$ به دست می آید لذا $f_{fund} = \frac{\pi}{\omega}$. با جایگذاری $y=1$ و $f_{fund} = \frac{\pi}{\omega}$ در معادله (۸-۲) عدد وبر بحرانی بدست می آید:

$$\vartheta_{cirt} = \frac{2 \vartheta_k \vartheta_b}{\vartheta_F \left(1 + \vartheta^{-\frac{\pi}{\omega \tau}} \right)} \quad (۲۰-۲)$$

ملاحظه می شود که مقدار به دست آمده برای عدد وبر بحرانی در رابطه (۲۰-۲) به چگالی فاز گازی وابسته نیست، در حالی که بررسی های ابعادی و همچنین تحقیقات کوشیزوکا و همکارانش حاکی از وابستگی عدد وبر بحرانی به نسبت چگالی دو فاز است. با جاگذاری مقادیر τ و ω روابط (۱۲-۲) و (۱۳-۲) می توان به آسانی نشان داد که مقدار $\omega \tau$ به سمت مقادیر خیلی بزرگ میل می کند. بنابراین داریم:

$$\omega\tau = \sqrt{\frac{32\Omega_l\Omega}{25\Omega_l^2} - 1} \quad (21-2)$$

با توجه به اینکه برای اغلب قطرات اسپری شونده مقدار $\omega\tau$ بزرگ بوده لذا می توان نوشت :

$$1 + \Omega \frac{\pi}{\omega\tau} \cong 2 \quad (22-2)$$

بدین ترتیب می توان رابطه (20-2) به صورت زیر نوشت:

$$\Omega_{crit} \cong \frac{\Omega_k \Omega_b}{\Omega_F} \quad (23-2)$$

که با توجه به مقادیر ارایه شده در روابط (2-14)، (2-15) و (2-16) مقدار وبر بحرانی برابر است با:

$$\Omega_{crit} \cong 12 \quad (24-2)$$

۲-۵- تحلیل ناپایداری کلوین-هلمهولتز در سطح قطره

مشاهدات تجربی حاکی از آن است که شکست قطره با ساز و کارهای مختلفی رخ می دهد؛ تغییر شکل قطره، لایه لایه شدن لایه مرزی و تحریک های سطحی که می تواند ناشی از ناپایداری های کلوین-هلمهولتز یا رایلی-تیلور باشد [۱۳]. در واقع این ساز و کارها به صورت جداگانه عمل نمی کنند و به طور همزمان در رخداد شکست شرکت دارند. ناپایداری کلوین-هلمهولتز به دلیل حرکت نسبی مماسی در فصل مشترک دو فاز به وجود می آید اما ناپایداری رایلی-تیلور در مواردی که سیستم تحت تأثیر بردار شتابی عمود بر فصل مشترک دو فاز قرار می گیرد، ظاهر می شود. این ناپایداری نشئت گرفته از لختی سیال چگال تر است. از آنجا که ناپایداری های سطحی متأثر از نسبت چگالی دو فاز است لذا در این پروژه به منظور برآورد میزان وابستگی عدد وبر بحرانی به متغیر نسبت چگالی دو فاز، ناپایداری های سطحی با روش مود معمولی (Normal) بررسی شده است.

برای ناپایداری کلوین-هلمهولتز یک تحریک سطحی مانند $\emptyset$ در معادله لاپلاس صدق میکند [۱۴].

$$\nabla^2(\phi) = 0 \quad (25-2)$$

می توان جواب معادله فوق را به صورت زیر فرض کرد:

$$\phi(x, z) = \phi_0 e^{i(\zeta x - \omega z)} \quad (26-2)$$

با توجه به رشد توانی تحریک مذکور در ناحیه خطی داریم:

$$\omega = \zeta \left(\frac{\zeta_c \zeta_d + \zeta_d \zeta_d}{\zeta_c + \zeta_d} \pm \frac{\sqrt{(\zeta_c + \zeta_d)\zeta_d - \zeta_c \zeta_d (\zeta_c - \zeta_d)^2}}{\zeta_c + \zeta_d} \right) \quad (27-2)$$

عدد موج بحرانی و طول موج بحرانی به ترتیب عبارت اند از:

$$\zeta_{cr} = \frac{\zeta_c \zeta_d (\zeta_c - \zeta_d)^2}{\zeta (\zeta_c + \zeta_d)} \quad (28-2)$$

$$\zeta_{cr} = \frac{2\zeta}{\zeta_{cr}} \quad (29-2)$$

زیرنویس های c و d مربوط به فاز پیوسته و قطره هستند. شعاع بحرانی قطره بزرگ ترین شعاعی است که قطره می تواند در شرایط هیدرودینامیکی مورد نظر پایدار بماند. لذا برای به دست آوردن عدد وبر بحرانی کافی است در تعریف عدد وبر قطر قطره را برابر با دو برابر طول موج بحرانی تحریک فرض کرد:

$$\zeta_{cr} = \frac{\zeta_c (\zeta_c - \zeta_d)^2 (2\zeta_{cr})}{\zeta} \quad (30-2)$$

با جایگذاری رابطه (29-2) در (30-2) خواهیم داشت:

$$\zeta_{cr} = 4\zeta \left(1 + \frac{\zeta_c}{\zeta_d} \right) = 4\zeta \left(1 + \frac{1}{\zeta} \right) \quad (31-2)$$

که S نسبت چگالی قطره به چگالی فاز پیوسته است. همان طور که از معادله (31-2) پیداست، با افزایش نسبت چگالی دو فاز، عدد وبر بحرانی کاهش می یابد. اگر چگالی قطره از چگالی فاز پیوسته اطراف آن خیلی بیشتر باشد ($\zeta \gg 1$) آنگاه وبر بحرانی به مقدار 4π میل می کند که تقریباً همان

مقداری است که در همه مدل‌های شکست قطره به آن اشاره شده است ($cr = 12$) ولی با کاهش نسبت چگالی (s) مقدار عدد وبر بحرانی نیز افزایش می‌یابد.

۲-۶- مدل‌ها و چگونگی شکل‌گیری اسپری

یک مدل واقعی از اسپری باید پدیده‌های مختلفی از قبیل خصوصیات هیدرودینامیکی پاشش و شکل‌گیری اسپری، خصوصیات انتقال قطرات مجزا و جریان دو فازي مغشوش اسپری را در نظر بگیرد. بنابراین ارائه مدل‌های توصیف‌کننده خصوصیات اسپری همراه با مشکلات متعددی که ناشی از طبیعت دو فازي فرآیندهای مغشوش می‌باشند، است. مدل‌های شکل‌گیری اسپری در سیستم‌های دوفازی می‌توانند به چهار بخش اصلی تقسیم شوند:

(۱) مدل‌های برخورد

(۲) مدل‌های نفوذ

(۳) مدل‌های شکست

(۴) مدل‌های جریان

۲-۶-۱- مدل‌های برخورد قطرات

در میان مدل‌های اسپری، ضعیف‌ترین مدل، مدل برخورد قطرات است. این ضعف ناشی از وابستگی ذاتی شبکه‌ها است، به عبارت دیگر برخوردهای بین دسته‌های قطرات وقتی معنی‌دار هستند که درصد حجمی مایع زیاد باشد. اگر چه همه اسپری‌ها در شروع متراکم هستند، اما این درصد حجمی، مساله‌ای در رابطه با دقت شبکه محاسباتی است. چون شبکه محاسباتی با سلول‌های کوچک، یک درصد حجمی مایع بیشتر از یک شبکه با سلول‌های بزرگتر را در بر خواهد گرفت.

طبق یافته‌های ارورکه برخورد بین دو قطره هنگامی اتفاق می‌افتد که دو قطره، سلول محاسباتی

یکسانی را اشغال کنند و احتمال برخورد، از مقدار آغازین که بر اساس کثرت برخورد پایه ریزی شده است، بیشتر است [۱۵].

کثرت (فراوانی) برخورد بصورت زیر تعریف می شود.

$$\beta = \frac{\sigma}{4\pi} \sigma_{d,small} (\sigma_{small} + \sigma_{large})^2 |\sigma_{d,small} - \sigma_{d,large}| \sigma_{12} \quad (32-2)$$

در اینجا σ_{12} بازدهی برخورد است. کاهش دادن اندازه سلول دو اثر خواهد داشت. یکی افزایش شانس برخورد، بر طبق معادله فوق و دیگری، دامنه ای که در آنجا قطره ها با هم برخورد می کنند را کاهش خواهد داد. چون دو قطره در یک سلول یکسان نیستند، احتمال برخوردشان صفر است. در نهایت، اگر اندازه سلول با سایز قطره یکسان باشد، فقط یک قطره سلول را اشغال خواهد کرد و هیچ برخوردی اتفاق نمی افتد. نقطه ضعف دیگر این روش این است که بدون توجه به اینکه قطره ها بطرف هم حرکت می کنند یا از یکدیگر دور می شوند، یک شانس مساوی برای برخورد قطره ها وجود دارد. اگر مکان برخورد نزدیک سلول باشد، شانس برخورد بسیار بیشتر از موقعی است که مکان برخورد بین دو سلول باشد. کنترل این امر در یک هندسه پیچیده بسیار مشکل است.

۲-۶-۱-۱- مدل برخورد بهبود یافته

مدل بهبود یافته برخورد قطرات توسط گاوایسس^۱ [۱۶] در سال ۱۹۹۷ ارائه شد. این مدل همان مدل برخورد اوروکه می باشد با این تفاوت که معیار پدیده برخورد کمی تغییر کرده است. در مدل اوروکه فرض بر این بود که زمانی ممکن است دو دسته قطره با هم برخورد کنند که هر دو در یک زمان معین در یک سلول محاسباتی مشخص قرار داشته باشند. این فرضیه یکی از نقاط ضعف مدل اوروکه محسوب می شود چرا که با تغییر اندازه شبکه محاسباتی، احتمال رخداد برخورد دسته قطرات نیز

^۱ Gavaises

تغییر می کند. این امر می تواند تا حدی وابستگی محاسبات را به اندازه شبکه محاسباتی به همراه داشته باشد. گاوایسس با تعریف یک فاصله بحرانی این معضل را حل کرد. بر طبق مدل بهبود یافته اوروکه که توسط گاوایسس ارایه شد، زمانی ممکن است دو دسته قطره با هم برخورد کنند که فاصله آنها از یک مقدار معین و مشخص کمتر باشد. این فاصله مشخص تحت عنوان فاصله بحرانی ($\varnothing_{cri}$) در برخورد بیان شده است. به عبارت دیگر می توان معیار برخورد را به صورت زیر بیان نمود:

$$\varnothing_{1,2} \leq \varnothing_{cri} = \frac{2(\varnothing_1 \varnothing_2 + \varnothing_2 \varnothing_2)}{\varnothing_1 \varnothing_2} \quad (33-2)$$

در اینجا $\varnothing_{1,2}$ فاصله دو دسته قطره از یکدیگر است. معمولاً در برخورد دو قطره، قطره بزرگتر را کلکتور^۱ می نامند و اندیس "۱" را برای آن به کار می برند. برای قطره کوچکتر هم از اندیس "۲" استفاده می شود و با اسم دونور^۲ شناخته می شوند. در رابطه فوق $\varnothing_1$ و $\varnothing_2$ به ترتیب بیانگر شعاع و تعداد قطرات موجود در دسته قطره بزرگتر (کلکتور) و $\varnothing_2$ و $\varnothing_2$ شعاع و تعداد قطرات موجود در دسته قطره کوچکتر (دونور) هستند.

فرکانس برخورد کلکتور با تمام قطرات موجود در پارسل دیگر عبارت است از [۱۶]:

$$\nu = \pi(\varnothing_1 + \varnothing_2)^2 |\varnothing_{d,1} - \varnothing_{d,2}| \varnothing_{1,2} \frac{\varnothing_2}{\varnothing} \quad (34-2)$$

$\varnothing$ حجم سلول محاسباتی است و $\varnothing_{1,2}$ راندمان برخورد می باشد که به صورت زیر بیان می شود:

$$\varnothing_{1,2} = \begin{cases} \left(1 + \frac{0.75 \ln(2\varnothing)}{\varnothing - 1.214}\right) & \varnothing > 1.214 \\ 0 & \varnothing \leq 1.214 \end{cases} \quad (35-2)$$

W یک کمیت بی بعد است که به شکل زیر تعریف می گردد:

$$\varnothing = \frac{\varnothing_{d,2} |\varnothing_{d,1} - \varnothing_{d,2}| \varnothing_{d,2}^2}{9\varnothing \varnothing_{d,1}} \quad (36-2)$$

^۱ Collector

^۲ Donor

احتمال اینکه $\bar{z}$ برخورد بین قطرات کلکتور با پارسل دونور در طی یک گام زمانی ($\bar{z}$) رخ دهد از یک توزیع پواسون با مقدار متوسط $\bar{z} \cdot \bar{z}' = \bar{z}$ تبعیت می کند ($\bar{z}$) از رابطه (۳۴-۲) محاسبه می شود):

$$\bar{z}_n = \frac{(\bar{z}')^n}{n!} \bar{z}^{-n'} \quad (37-2)$$

و احتمال اینکه هیچ برخوردی صورت نگیرد ($\bar{z} = 0$) عبارت است از:

$$\bar{z}_0 = \bar{z}^{-n'} \quad (38-2)$$

برای بیان اینکه برخوردی صورت میگیرد یا نه، یک عدد تصادفی مانند z در بازه $0 < \bar{z} < 1$ انتخاب می شود. اگر $\bar{z}_0 < \bar{z}$ باشد هیچ برخوردی صورت نمیگیرد، در غیر این صورت برخورد رخ خواهد داد. در صورتی که برخورد رخ دهد، احتمال اینکه نتیجه برخورد به هم چسبیدن قطرات باشد از رابطه زیر برآورد می شود:

$$\bar{z}_{coal} = \bar{z} \left[\frac{2.4\bar{z}(\bar{z})}{\bar{z}_l}, 1 \right] \quad (39-2)$$

که $\bar{z}(\bar{z})$ برابر است با:

$$\bar{z}(\bar{z}) = \bar{z}^3 - 2.4\bar{z}^2 + 2.7\bar{z} \quad (40-2)$$

$$\gamma = \frac{\bar{z}_1}{\bar{z}_2} \quad (41-2)$$

$\bar{z}_l$ در معادلات بالا برابر است با:

$$\bar{z}_l = \frac{\bar{z}_l |\bar{z}_{d,1} - \bar{z}_{d,2}|^2 \bar{z}_2}{2\bar{z}} \quad (42-2)$$

برای تعیین اینکه برخورد از نوع به هم چسبیدن است یا جدایش، عدد تصادفی دیگری مانند L در بازه $0 < \bar{z} < 1$ انتخاب می شود. اگر $\bar{z}_{coal} < \bar{z}$ قطرات پس از برخورد به هم می چسبند و تعداد

قطرانی که به هر قطره پارسل کلکتور برخورد می کنند (m) از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sum_{i=0}^{m-1} \frac{\varpi_i}{\varpi_0} < \frac{\varpi}{\varpi_0} < \sum_{i=0}^m \frac{\varpi_i}{\varpi_0} \quad (43-2)$$

تعداد قطرات به وجود آمده در پارسل دونور هم برابر است با:

$$\varpi_2^{new} = \varpi_2 - \varpi \varpi_1 \quad (44-2)$$

اگر مقدار محاسبه شده برای m از معادله (43-2) از کل قطرات موجود در پارسل دونور بیشتر باشد، باید محاسبات به گونه ای صورت گیرد که $\varpi_2^{new} = 0$ شود.

در شرایطی که قطرات به هم می چسبند ($\varpi < \varpi_{coal}$)، باید معادلات بقاء جرم، ممنتوم و انرژی برای قطرات پارسل کلکتور بازنویسی شوند:

$$\varpi_{d,1}'^3 = \varpi_{d,1}^3 + \varpi \varpi_{d,2}^3 \quad (45-2)$$

$$\varpi_{d,1}' = \frac{\varpi_{d,1} \varpi_{d,1}^3 + \varpi_{d,2} \varpi \varpi_{d,2}^3}{\varpi_{d,1}^3} \quad (46-2)$$

$$\varpi_{d,1}' = \frac{\varpi_{d,1} \varpi_{d,1}^3 + \varpi_{d,2} \varpi \varpi_{d,2}^3}{\varpi_{d,1}^3} \quad (47-2)$$

$$\varpi_{d,1}' = \frac{\varpi_{d,1} \varpi_{d,1}^3 + \varpi_{d,2} \varpi \varpi_{d,2}^3}{\varpi_{d,1}^3} \quad (48-2)$$

علامت (') نشانگر مقادیر متغیر ها پس از برخورد است.

در حالتی که قطرات پس از برخورد از هم جدا می شوند ($\varpi > \varpi_{coal}$) تبادل جرم و انرژی رخ نخواهد داد. در این حالت تنها کافی است معادلات بقاء ممنتوم برای هر دو پارسل کلکتور و دونور بازنویسی شوند:

$$\varpi_{d,1}' = \frac{\varpi_{d,1}^3 \varpi_{d,1} + \varpi_{d,2}^3 \varpi_{d,2} \varpi_{d,2}^3 (\varpi_{d,1} - \varpi_{d,2}) \left[\frac{\varpi - \varpi_{crit}}{\varpi_1 + \varpi_2 + \varpi_{crit}} \right]}{\varpi_{d,1}^3 + \varpi_{d,2}^3} \quad (49-2)$$

$$\bar{v}_{d,2}' = \frac{\bar{v}_{d,1}^3 \bar{v}_{d,1} + \bar{v}_{d,2}^3 \bar{v}_{d,2} \bar{v}_{d,1}^3 (\bar{v}_{d,2} - \bar{v}_{d,1}) \left[\frac{\bar{v} - \bar{v}_{crit}}{\bar{v}_1 + \bar{v}_2 + \bar{v}_{crit}} \right]}{\bar{v}_{d,1}^3 + \bar{v}_{d,2}^3} \quad (50-2)$$

در معادلات فوق $\bar{v}$ و $\bar{v}_{crit}$ به صورت زیر بیان می شوند:

$$\bar{v} = (\bar{v}_1 + \bar{v}_2) \sqrt{\bar{v}} \quad (51-2)$$

$$\bar{v}_{crit} = (\bar{v}_1 + \bar{v}_2) \sqrt{\bar{v}_{coal}} \quad (52-2)$$

۲-۶-۲- مدل های نفوذ

پژوهشگران زیادی از دیدگاههای مختلف برای مدلسازی نفوذ اسپری سیال تحقیق نموده اند. هنگامی که قطرات سیال از نازل خارج می شوند، در فاز گاز جریان پیدا کرده، جرم و ممنتوم خود را در داخل گاز توزیع نموده و تحت تاثیر نیروی درگ اعمال شده از سوی گاز قرار میگیرند. همچنین قطرات، با دمای اولیه کمتر از دمای محیط انرژی دریافت می کنند و تحت تاثیر توربولانس محیط قرار می گیرند و در فاز گاز نفوذ می کند. فاصله ای که قطرات در محفظه می پیماید را نفوذ می نامند. آگاهی کامل از فرآیند نفوذ اسپری، می تواند در راستای بهبود توزیع رطوبت و همچنین عملکرد نازل و در نتیجه برای بالابردن راندمان کاری در اکثر فرایندهای متنوع و مهم صنعتی از قبیل احتراق در محفظه احتراق توربینهای گازی و یا در موتورهای احتراق داخلی، خشک کننده ها، سرمایش به کمک تبخیر اسپری، تمیز کننده های سطح اجسام، چاپگرهای جوهر افشان و نظایر آن کمک شایانی کند. بنابر این لازم است پارامتر های موثر بر نفوذ قطره شناسایی گردد. ابتدا انواع مدل های نفوذ معرفی میگردند.

۲-۶-۱-۲- مدل نفوذ شیپرو

در این مدل، اثر خواص سیال که از پارامترهای موثر بر نفوذ اسپری می باشند، در نظر گرفته نشده است. شیپرو، رفتار اسپری را با تزریق پرفشار اسپری در محفظه گازی مورد تحلیل قرار داد او فشارهای ۲۰۰ تا ۲۵۰ بار را برای تزریق اسپری در نظر گرفت و با قطرهای متفاوت نازل از ۰/۲۱۰ تا ۰/۴۲۰ میلی متر و دارای نسبت $\frac{L}{d}$ بین ۲ تا ۸، رفتار اسپری را بررسی کرد و پس از بدست آمدن داده های تجربی حداکثر نفوذ (S) را بصورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\bar{z}}{\bar{z}_{inj}} = 4.13 \left[\frac{\bar{z}}{\bar{z}_{inj}} \sqrt{\frac{\Delta \bar{z}}{\bar{z}_g}} \right]^{0.64} \left(\frac{\bar{z}}{\bar{z}_{inj}} \right)^{0.18} \quad (۵۳-۲)$$

۲-۶-۳- مدل نفوذ ویلیامز

در این مدل، اثر کشش سطحی قطره و همچنین هندسه نازل که از پارامترهای موثر بر نفوذ اسپری می باشند، در نظر گرفته نشده است. ویلیامز^۱ رفتار اسپری را بوسیله عکس برداری پرسرعت و در سه فشار تزریق مختلف ۱۷۰، ۲۲۰ و ۲۵۰ بار برای پنج سیال مختلف، به محفظه ای پرفشار تزریق نمود و پس از بدست آمدن داده های تجربی حداکثر نفوذ (S) را بصورت زیر بیان کرد [۱۷]:

$$\bar{z} = 0.461 \left[\frac{\Delta \bar{z}}{\bar{z}_g} \right]^{0.25} \left[\frac{\bar{z}_d}{\bar{z}_d} \right]^{0.11} \tan h(\bar{z}^{0.715}) \quad (۵۴-۲)$$

۲-۶-۴- مدل نفوذ گاسمن

در این مدل چون تمام پارامترهای موثر بر نفوذ اسپری در نظر گرفته شده است، بنابر این دارای دقت

^۱ Williams

بالتر و کیفیت بهتری نسبت به سایر روشها می باشد. گاسمن^۱ رفتار اسپری را با تزریق های پرفشار ثابت که حدود ۱۵۰ تا ۲۴۰ بار، قطر نازلشان بین ۰/۱۸۰ و ۰/۵۳۰ میلیمتر، دارای نسبت $\frac{l}{d}$ بین ۲ تا ۱۰ و برای سیال های مختلف مورد بررسی قرار دارد، این مدل بر اساس چهار پارامتر بدون بعد حداکثر نفوذ اسپری (S) را توصیف می کند [۱۸].

$$\varnothing_1 = \Delta \varnothing_g \frac{\varnothing_{inj}^2}{\varnothing_d^2} \quad (55-2)$$

$$\varnothing_2 = \varnothing_d \varnothing_d \frac{\varnothing_{inj}}{\varnothing_d^2} \quad (56-2)$$

$$\varnothing_3 = \frac{\varnothing_d}{\varnothing_g} \quad (57-2)$$

$$\varnothing_4 = \frac{\varnothing}{\varnothing_{inj}} \quad (58-2)$$

بعد از ترکیب این پارامتر های بدون بعد و با استفاده از داده های تجربی حداکثر نفوذ (S) بصورت زیر بدست آمده است:

$$\bar{\varnothing} = 1.1(\varnothing_1)^{0.3}(\varnothing_2)^{-0.008}(\varnothing_3)^{0.5}(\varnothing_4)^{0.16} \bar{\varnothing}^{0.5} \quad (59-2)$$

۲-۶-۵- تاثیر پارامتر های مختلف بر مقدار نفوذ

در این بخش ۳ پارامتر فشار پاشش، جریان های گردابی هوا و هندسه نازل مورد بررسی قرار گرفت که به ترتیب به صورت ذیل بیان میگردد.

^۲ Gosman

۲-۶-۶- تاثیر فشار پاشش بر مقدار نفوذ

هی و جونز^۱ طی آزمایشاتی اثر فشار پاشش را روی نفوذ مورد بررسی قرار دادند و دریافتند، که افزایش فشار سبب می شود، نفوذ به مقدار قابل توجه ای افزایش یابد، ولی افزایش بیشتر فشار از یک حد معین سبب می شود، نفوذ بسیار کمتر افزایش یابد [۱۹]. انرژی ذره متناسب با جرم ذره و سرعت آن است. با افزایش سرعت انرژی ذرات بیشتر می شود. ولی چون ذرات ریزتر شده اند، جرم آنها کاهش یافته است. بنابراین انرژی کاهش می یابد. در نتیجه، افزایش فشار دو مسئله ایجاد می کند، که یکی باعث افزایش نفوذ و دیگری باعث نفوذ کمتر می شود ولی در حالت کلی با افزایش فشار، نفوذ با میزان کمتر زیاد می شود.

۲-۶-۶-۱- تاثیر جریان گردابی هوا بر مقدار نفوذ

الکاتب و همکارانش نفوذ سیال در نسبتهای گردابی معین را مورد آزمایش قرار دادند و به این نتایج دست یافتند، که اثر جریان گردابی به اختلاط سریعتر سیال و هوا کمک میکند [۲۰]. چون حرکتهای نسبی در دو جهت شعاعی و مماسی نسبت به سطح قطره و هوا وجود دارد، بنابراین اسپری سیال به تدریج در جهت جریان هوا کمانش پیدا می کند. برای شرایط یکسان تزریق، نفوذ اسپری سیال در حالت وجود جریان گردابی هوا کمتر از حالت بدون جریان گردابی است. لازم به ذکر است، که در هیچ یک از مدلهای توصیف شده شپیرو، ویلیامز و گاسمن اثر جریان گردابی لحاظ نشده است و این مدلهای بدون در نظر گرفتن اثر جریان گردابی بیان شده اند.

۲-۶-۶-۲- اثر هندسه نازل بر مقدار نفوذ

هی و جونز اثر قطر نازل را بر نفوذ اسپری مورد بررسی قرار دادند. آنها نتایج محققان دیگر را با نتایج خود مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند، که با بزرگ شدن قطر نازل نفوذ افزایش می

^۱ Hay and Jones

یابد [۱۹]. زیرا با افزایش قطر نازل، قطر ذرات خروجی از نازل بزرگتر می شود و ذرات دارای انرژی جنبشی بیشتر می شوند. یا به تعبیر دیگر نسبت ممنتوم اسپری به مقاومت هوا افزایش می یابد. اثرات نسبت طول نازل به قطر آن $\frac{l}{d}$ روی نفوذ اسپری، توسط وارد و پوپا^۱ [۲۱] مورد بررسی قرار گرفت، که مشخص شد کاهش سرعت در نوک اسپری در نازل هایی با نسبت $\frac{l}{d}$ بزرگتر کمتر است. پس برای یک فشار پاشش معین، افزایش در نسبت $\frac{l}{d}$ سبب افزایش نفوذ می شود.

۲-۶-۷- مدل های شکست

فرآیند فیزیکی شکست قطره ها توسط افراد زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل های شکست قطره ها را میتوان به سه دسته ناگهانی، پیوسته و اینگل^۲ تقسیم کرد [۲۲]. و مدل ناگهانی که همان مدل ریتس و دیواکر^۳ می باشد خود به دو دسته ی کیفی^۴ و استریپینگ^۵ تقسیم می شود هنگامیکه سیال مایع تزریق می شود، سیال شروع به تغییر شکل و شکسته شدن می کند، این عمل زمانی اتفاق می افتد که عدد وبر (We) به اندازه کافی بزرگ باشد. یکی از اهداف مدل شکست نشان دادن کاهش اندازه مشخص سیال مایع، ناشی از نیروی آیرودینامیکی است. در ادامه به توضیح مدل های مهم شکست می پردازیم.

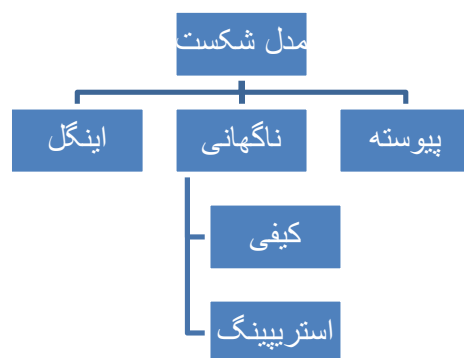
^۱ Varde & Popa

^۲ Engle

^۳ Reits & Diwakar

^۴ Bag

^۵ Stripping



شکل (۳-۲) مدل های شکست قطره

۲-۶-۷-۱- مدل chu

این مدل که توسط c.c.chu ارائه شده ، بر اساس ناپایداریهای ریلی-تیلور پایه گذاری شده است. روابط تئوری این مدل به منظور پیشبینی اندازه قطرات بر اساس یک تابع نمایی، ایجاد شده اند. در این مدل از زمان شروع شکست، قطر قطرات به صورت تابعی از زمان به صورت زیر تشریح میشود:

$$\frac{r}{r_0} = -r_0 r_1 r_2^{C_2} (r_{rel} r^{0.5}) r^{*(C_1-1)} \quad (۶۰-۲)$$

که r_0 به صورت تابعی از نسبت چگالی ϵ می باشد:

$$r_0 = 0.1708 - 0.149 r^{0.5} \quad (۶۱-۲)$$

$$\epsilon = \frac{r_g}{r_l} \quad (۶۲-۲)$$

و r^* زمان بی بعد شده است:

$$r^* = \frac{r^{0.5} r_{rel} r}{r_0} \quad (۶۳-۲)$$

برای دو ثابت استفاده شده در این مدل مقادیر $r_1 = 0.772$ و $r_2 = 0.246$ توسط chu پیشنهاد شده است.

۲-۶-۷-۲- مدل ریتس - دیواکر

مدل ریتس و دیواکر از دسته مدل های وابسته به پدیده شناسی^۱ است. در این مدل زمان شکست و قطر قطرات برای دو ناحیه مختلف شکست قطرات شامل ناحیه شکست چتر نجاتی (کیفی) و ناحیه شکست برهنگی بدست می آیند. در ناحیه شکست چتر نجاتی معیار شکست قطرات فقط عدد وبر می باشد، بطوریکه اگر عدد وبر بزرگتر از عدد ۶ گردد قطره شکسته می شود و اگر کمتر از آن باشد پیوستگی خود را حفظ می کند [۲۳].

رابطه حاکم بر شکست قطرات در این حالت به صورت زیر است:

$$\mathcal{W} = \frac{\mathcal{W}_g \mathcal{W}_{rel}^2 \mathcal{W}_d}{2\mathcal{W}} > 6 \quad (۲-۶۴)$$

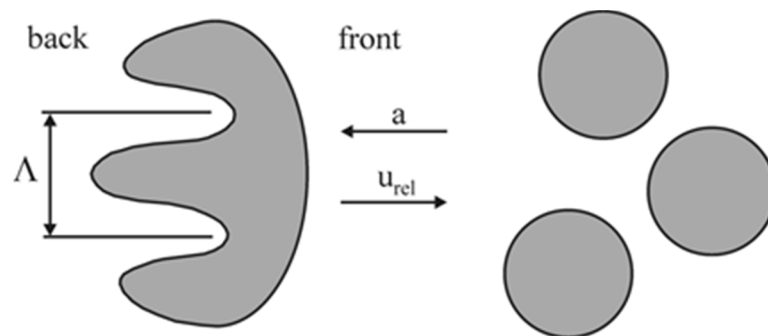
زمان عمر ناپایداری قطرات به صورت زیر تعریف میگردد:

$$\mathcal{W}_1 = \mathcal{W} \left[\frac{\mathcal{W}_l \mathcal{W}_d^3}{16\mathcal{W}} \right]^{0.5} \quad (۲-۶۵)$$

۲-۶-۷-۳- مدل ریلی-تیلور

مدل ریلی-تیلور براساس کارهای تحلیلی تیلور پایگذاری شده است، که ناپایداری سطح بین دو سیال با چگالی های مختلف را با اعمال یک شتاب منفی (یا کاهش سرعت) عمود بر این سطح بررسی کرده است. اگر قطرات، نازل را با سرعت بالا ترک کنند و به واسطه نیروی پسای آئرودینامیکی به شدت کاهش سرعت دهند، قطرات به علت اینرسی مایع فروپاشیده شوند [۲۴].

^۱ Phenomenological Models



شکل (۴-۲) شماتیک فروپاشی قطره

با به کار بردن یک تحلیل پایداری خطی و با صرفه نظر کردن از لزجت مایع، نرخ رشد و طول موج برای سریعترین موج رشد کرده به صورت زیر حاصل می شوند:

$$\Pi = \sqrt{\frac{2[\rho(\rho_l - \rho_g)]^{\frac{3}{2}}}{3\sqrt{3\rho}(\rho_l + \rho_g)}} \quad (۶۶-۲)$$

$$\varrho = \rho_3 2\rho \sqrt{\frac{3\rho}{\rho(\rho_l - \rho_g)}} \quad (۶۷-۲)$$

۲-۶-۸- مدل های جریان

۲-۶-۸-۱- مدل های جریان همگن موضعی

ترینگ و نیوبای^۱ [۲۵] دریافتند که می توان طول جریان اسپری مغشوش را با فرض جریان همگن موضعی و صرف نظر از اثر لغزش میان فازهای مایع و گاز برآورد نمود. بر این اساس فرض می شود که هر دو فاز جریان دارای درجه حرارت و سرعت یکسان بوده و دارای تعادل فاز می باشند. با این فرضیات جریان اسپری معادل یک جت گاز می باشد که دارای شرایط استوکیومتری و ممنتوم مساوی با ممنتوم اسپری است. اشاره به این نکته مهم است که شرط موجود در مدل جریان همگن

^۱ Thring & Newby

موضعی می تواند بعنوان یک محدودیت برای اسپری های متشکل از بی نهایت قطرات ریز محسوب شود. نیومن و برزوستوفسکی^۱ [۲۶] در مطالعه مربوط به تبخیر اسپرهای مایع در شرایط فوق بحرانی روش جریان همگن موضعی را بکار بردند. چون چگالی گاز و مایع در شرایط فوق بحرانی برابر هستند به همین دلیل استفاده از روش جریان موضعی معقول به نظر می رسد.

خصوصیت اصلی مدل های جریان همگن موضعی این است که مقادیر نرخهای میان فازها در مقایسه با نرخ گسترش در کل میدان جریان بیشتر می باشند. این تقریب مستلزم آن است که در هر نقطه واقع در جریان همه فازها دارای سرعت یکسان بوده و در حالت تعادل ترمودینامیکی باشند. شرط لازم برای مدل جریان همگن موضعی را می توان به راحتی از طریق پخش یک فاز گازی در یک فاز مایع پیوسته، که ناشی از اینرسی و ظرفیت حرارتی نسبتاً پایین حبابها باشد، ارضا کرد. برای اسپری هایی که در آنها فاز مایع ناپیوسته و فاز گاز پیوسته است، بشرط آنکه اندازه قطرات کوچک باشد، چگالی فازها تقریباً نزدیک به هم بوده و نرخ گسترش فرآیند آهسته باشد، تقریب جریان همگن موضعی مناسب ترین روش می باشد.

مزایای مدل جریان همگن موضعی

۱. این مدل به حداقل اطلاعات راجع به مشخصات نازل نیاز دارد چون توزیع سرعت ها و اندازه

ی اولیه قطرات در محاسبات تاثیر ندارد.

۲. در این مدل محاسبات مربوط به اسپری تقریباً شبیه به محاسبات مربوط به جریان های تک فاز است.

۳. این مدل به اطلاعات تجربی و آزمایشگاهی کمی نیاز دارد.

فائت معتقد است [۲۷]، مدل های جریان همگن موضعی تخمین اولیه معقول و مناسبی را از فرآیند های توسعه اسپری برآورد می کنند. این مدلها در ارائه اطلاعات نسبتاً کم از اندازه اسپری مفید می

^۱ Newman & Brzustowski

باشند. همچنین این مدلها می توانند با ارائه اطلاعاتی مربوط به بهبود اتمیزه شدن و آزمایش، باعث پیشرفت و بهبود در برآورد فرآیند پتانسیل شوند.

مدل های جریان جدا شده:

این مدل معقولانه ترین روش در مطالعه اسپری می باشد چرا که اثرات نرخ های محدود منتقل شونده میان دو فاز را نیز در نظر می گیرد. مدل های توربولانس بکار رفته در جریانهای دوفازی، با در نظر گرفتن تغییرات سرعت، درجه حرارت و غلظت ذرات پیشرفت کرده اند. استفاده از مدل های جریان جدا شده از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. چرا که مدل های جریان همگن موضعی شدید به این شرط که قطرات در جریان اسپری بینهایت کوچک هستند، وابسته و محدود می شوند.

ویژگی های جریان جدا شونده:

همانطور که ذکر شد این مدل منطقی ترین مدلی است که برای شبیه سازی مسائل اسپری بکار می رود. بویژه که این مدلها با تبادل نرخ های محدود تبدیل جرم، ممنتوم و انرژی منتقل شونده میان فازهای گاز و مایع نیز سرو کار دارند. با این وجود بواسطه محدودیت هایی که در ذخیره و هزینه محاسبات در کامپیوتر وجود دارد، محققین با سعی بر داشتن دقت بالا و در نظر گرفتن جزئیات میدان جریان اطراف قطرات منفرد، از این مدلها استفاده می کنند.

۲-۷- مدلسازی اغتشاش

با توجه به اهمیت بسیاری که آشفتگی بر ساختار نازل ها، برخورد و شکست قطرات دارد، بررسی و مدلسازی دقیق آن در نازل ها امری ضروری می باشد. آشفتگی به طور مستقیم در فرایند پودر شدن و شکست قطرات اثرگذار است. همچنین نقش بسزایی در تعداد، اندازه و به ویژه مسیر حرکت قطرات کوچک ایجاد شده دارد. در ادامه به تشریح مدل های شایعه و متداول در مدلسازی آشفتگی در جریان قطرات سیال پرداخته می شود.

۲-۷-۱- مدل اغتشاش ϵ - استاندارد

این مدل در ابتدا برای بررسی آشفتگی در جریان های غیر قابل تراکم ارائه شد . اما بعدها گاسمن و واتکین^۱ [۲۸] اثرات تراکم پذیری سیالات را نیز وارد این معادلات نمودند. بعد از آن، تحقیقات گسترده ای بر روی معادله اتلاف آشفتگی، معادله ϵ (معادله ۲-۶۹)، صورت گرفت ولی معادله مربوط به انرژی جنبشی آشفتگی، معادله k (معادله ۲-۶۸)، بدون تغییر و اصلاح باقی مانده . ثابت C3 در سال ۱۹۸۰ توسط رینولدز برای در نظر گرفتن انبساط سرعت به معادله اضافه شد.

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} u_i = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\partial}{\partial x_j} + \epsilon \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \right] + \nu_T \left[\frac{\partial^2}{\partial x_i^2} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \epsilon \quad (2-68)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} u_i = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\partial}{\partial x_j} + \epsilon \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \right] + \nu_T \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial^2}{\partial x_i^2} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \epsilon_1 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \epsilon_2 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \\ & + \epsilon_3 \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2-69)$$

در معادلات بالا s برابر است با:

$$\epsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 \quad (2-70)$$

ثابت های به کار رفته در مدل ϵ - استاندارد به صورت زیر می باشد:

ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_μ	ϵ_ϵ	ϵ_k
۱,۴۴	۱,۹۲	-۰,۳۳	۰,۰۹	۱,۳	۱

۲-۷-۲- مدل اغتشاش ϵ - RNG

ϵ - RNG (Renormalized Group) نسخه ی بهبود یافته از مدل استاندارد ϵ - است که توسط یاخوت و اورسزگ^۲ در سال ۱۹۸۶ [۲۹] ارائه شد. این مدل در ابتدا برای تحلیل جریان های غیر

^۱ Gosman & Watkins

^۲ Yakhot and Orszag

غیر قابل تراکم ارائه شد. روش کار مدل RNG به این صورت است که کوچکترین مقیاس ها به صورت متقارن با هم حذف شده و تنها مقیاس های باقیمانده به صورت عددی حل می شوند. در این مدل معادله ی k همانند مدل $k - \epsilon$ استاندارد آورده شد، می باشد و تنها تفاوت معادله ϵ برای جریان های تراکم پذیر با مدل $k - \epsilon$ استاندارد در عبارت اتلاف جدیدی (ϵ) است که در معادله ی زیر وارد شده است.

$$\frac{\epsilon}{k} + \frac{\epsilon}{k_i} = \frac{\epsilon}{k_i} \left[\left(\frac{\epsilon_T}{\epsilon} + 1 \right) \frac{\epsilon}{k_i} \right] + \epsilon_T \epsilon_1 \frac{\epsilon}{k} \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\epsilon_T}{\epsilon} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \epsilon_1 \epsilon \frac{\epsilon}{k_i} - \epsilon_2 \epsilon \frac{\epsilon^2}{k} + \epsilon_3 \epsilon \epsilon \frac{\epsilon}{k_i} - \epsilon \quad (71-2)$$

در رابطه بالا S همانند مدل $k - \epsilon$ استاندارد بوده و R به صورت زیر تعریف میشود:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_T \epsilon^3 \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)}{1 + \epsilon \epsilon^3} \quad (72-2)$$

در معادله بالا η نسبت مقیاس آشفستگی به متوسط زمان کرنش می باشد و ϵ_0 مقدار اولیه آن و β نیز یک ثابت می باشد. اهمیت عبارت آخر در معادله ی ϵ در این مدل، به ویژه در جریان های یک سویه^۱، مانند افشانه های دیزل، مشخص است [۳۰]. ثابت های به کار رفته در شکل استاندارد مدل RNG در جدول زیر آورده شده است:

ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_μ	ϵ_ϵ	ϵ_k
۱,۴۲	۱,۹۲	-۰,۳۳	۰,۰۹	۰,۷۱۹	۱

۲-۸- مدلسازی نیروی پسا

با توجه به تاثیر زیادی که درگ بر روی مشخصات نازل، از جمله عمق نفوذ نازل و زاویه مخروطی نازل، دارد، مدلسازی نیروی درگ در کدهای CFD جهت تحلیل پدیده ی برخورد امری اجتناب ناپذیر است. محققین مختلفی، مانند لی یو و ریتز دریافتند که زمانی که یک قطره مایع با عدد وبر مناسبی وارد یک محیط گازی می شود، تغییر شکل داده و از حالت کروی خود منحرف می شود و با محیط گازی اطراف تقابل فیزیکی انجام می دهد. به همین علت، ضریب درگ قطره باید تابعی از عدد

^۲ One-directional flows

رینولدز آن باشد. بر این اساس لی یو و همکارانش [۳۱] با استفاده از مدل TAB به محاسبه این تغییر شکل پرداختند و توانستند رابطه ای میان ضریب درگ قطره و تغییر شکل آن پیدا کنند. متأسفانه این روش در قطرات با سرعت بالا جواب مناسبی را نمی دهد.

وقتی که یک قطره وارد محیط گازی می شود، فشار ناشی از نیروی آیرودینامیکی وارد بر آن باعث تغییر شکل قطره می شود. در کد عددی KIVA تغییرات سرعت قطره با توجه به شتاب آن به شکل زیر محاسبه می شود:

$$\rho_l \frac{d^2}{dt^2} = \rho_d \frac{d^2}{dt^2} \frac{\rho_g \rho_{rel}^2}{2} \quad (73-2)$$

$$\rho_d = \frac{4\pi r^3}{3} \quad \text{که همان حجم قطره کروی اولیه می باشد.}$$

در اینجا ضریب درگ قطره همانند ضریب درگ یک کره ی صلب بیان می شود:

$$\rho_{D,s} = \frac{24}{\rho} \left(1 + \frac{1}{6} \rho^{\frac{2}{3}} \right) \quad \rho \leq 1000 \quad (74-2)$$

$$\rho_{D,s} = 0.424 \quad \rho > 1000 \quad (75-2)$$

در معادلات بالا عدد رینولدز به صورت زیر بیان می شود:

$$\rho = \frac{2\rho_{rel}\rho_g}{\rho_g} \quad (76-2)$$

از آنجا که ضریب درگ یک قطره ی تغییر شکل یافته باید چیزی بین ضریب درگ متناظر با کره ی صلب و ضریب درگ یک دیسک باشد، لی یو و همکارانش رابطه ای برای محاسبه ضریب درگ قطره که وابسته به پارامتر انحراف از حالت کروی بودن، یعنی γ ، است را به صورت زیر ارائه کردند:

$$\rho_D = \rho_{D,s} (1 + 2.632\gamma) \quad (77-2)$$

فصل ۳:

معادلات و مدل سازی ریاضی

۳-۱- معادلات کلی

۳-۱-۱- مقدمه

به طور کل برای کم شدن وقت محاسبات، باید مدل‌های بکار گرفته شده برای قطرات تقریبی باشند. در مدل مورد توجه حرکت نسبی قطره در فاز گاز مطرح می باشد و با وجود اینکه قطرات متحرک در فاز گاز در حال تغییر شکل هستند ولی به لحاظ اینکه در روابط مربوط به درگ، از کره معادل استفاده می شود، قطرات کروی فرض می شوند. یکی از روشهای بررسی جریان دو فازی گاز - قطرات بکارگیری مدل قطرات مجزا^۱ می باشد. در این مدل دو فاز گاز و مایع از یکدیگر مجزا در نظر گرفته می شوند و در فاز مایع کل اسپری به دسته هایی از قطرات تقسیم می شوند. هر دسته دارای قطر، سرعت، موقعیت مکانی، درجه حرارت و زمان سپری شده پس از تزریق یکسان هستند. در مدل DDM مشخصات هر دسته از قطرات تا وقتی که در میدان حل وجود داشته باشند و با اینکه به فاز گاز ملحق نشده باشند (تبخیر کامل) در هر لحظه توسط معادلات لاگرانژی محاسبه می شوند. با تغییرات مشخصات قطرات می توان ترمهای تولید که در معادلات اولری فاز گاز وجود دارند را محاسبه نمود. در ادامه به بررسی روابط لازم برای تحقیق در چگونگی تزریق و تولید قطرات در یک میدان جریان گاز و اثر متقابل دو فاز بر یکدیگر و چگونگی شکست قطرات و بالاخره چگونگی برخورد قطرات اسپری پرداخته خواهد شد.

^۱ DDM

۳-۱-۲- فاز پیوسته

مدل لاگرانژی - اوپلری که توسط نیجدام^۱ و همکاران برای جریان هوا ارائه شد عبارت است از [۳۲]:

$$\frac{\rho}{\rho_i}(\rho_i) = \rho_i, \quad (۱-۳)$$

$$\rho_j \frac{\rho_i}{\rho_j} = \frac{\rho}{\rho_j} \left[\rho \left(\frac{\rho_i}{\rho_j} + \frac{\rho_j}{\rho_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \left(\frac{\rho_i}{\rho_j} + \frac{\rho_j}{\rho_i} \right) \rho_{ij} \right] + \rho_j \rho_{i2} - \frac{\rho}{\rho_i} + \rho \quad (۲-۳)$$

$$\rho_i \frac{\rho}{\rho_i} = -\rho \frac{\rho_i}{\rho_i} + \phi_v + \frac{\rho}{\rho_i} \left(\rho \frac{\rho}{\rho_i} \right) + \frac{\rho}{\rho_i} \left(\sum_{i'=1}^n h_{i'} \rho_{i'} \right) + \rho_h \quad (۳-۳)$$

$$\rho_i \frac{\rho_{i'}}{\rho_i} = \frac{\rho_{i',i}}{\rho_i} + \rho_{i'} \quad (۴-۳)$$

$$\rho_{i',i} = \rho_{i',m} \frac{\rho_{i'}}{\rho_i} \quad (۵-۳)$$

۳-۱-۳- فاز گسسته

برای مدل فاز گسسته^۲ معادلات قطرات آب کروی در یک قاب مرجع لاگرانژی نوشته شده و از توازن نیرو بیش از یک ذره و معادله مسیر مربوطه تشکیل شده است.

$$\frac{\rho_p}{\rho} = \frac{18 \rho_p \rho}{\rho_p^2 \rho_p} \frac{p}{24} (\rho - \rho_p) + \rho \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + \frac{\rho}{\rho_p} \rho_p \frac{\rho}{\rho_p} + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{\rho}{\rho_p} (\rho - \rho_p) \quad (۶-۳)$$

$$\frac{\rho_p}{\rho} = \rho_p \quad (۷-۳)$$

^۲ nijdam

^۱ DPM

با توجه به معادلات بالا میتوان نوشت :

$$\bar{p} = \frac{\bar{p}_p(\bar{p} - \bar{p}_p)}{\bar{p}} \quad (۸-۳)$$

$$\bar{D} = \frac{a_1 + a_2}{Re_p + a_3} \quad (۹-۳)$$

ضرایب $\bar{D}_1, \bar{D}_2$ و $\bar{D}_3$ برای ذرات کروی و صاف که مرتبط با ضریب درگ میباشد در چندین رینولدز مختلف مورد بررسی قرار گرفته که مقادیر آن از یافته های مرسی و الکساندر استخراج شده است [۳۳].

تعالادل انرژی در قطرات به شرح زیر میباشد:

$$\bar{p}_p \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}} = h \bar{p}_p (\bar{p} - \bar{p}_p) \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}} h_{fg} \quad (۱۰-۳)$$

۳-۱-۴- اتصال بین فاز گسسته و پیوسته

معادلات فاز پیوسته و گسسته با بیان معادلات بقاء همراه است. انتقال جرم از قطرات (فاز گسسته) به هوا (فاز پیوسته) به عنوان تغییر جرم یک قطره با عبور از هر حجم کنترل تعیین می شود [۳۴].

$$\bar{D}_i = \frac{\Delta \bar{p}_p}{\bar{p}} \frac{\bar{p}_{p0}}{\bar{p}_{p0}} \quad (۱۱-۳)$$

۳-۱-۵- معادله ممنتوم و انرژی

$$\bar{D}_i = \left(\frac{18 \bar{p}_p \bar{D}_p \bar{p}_p}{24} (\bar{p} - \bar{p}_p) + \bar{p} \frac{\bar{p}_p - \bar{p}}{\bar{p}_p} + \frac{\bar{p}}{\bar{p}_p} \bar{p}_p \frac{\bar{p}}{\bar{p}_p} \right) \bar{p}_{p0} \frac{\bar{p}}{\bar{p}} \quad (۱۲-۳)$$

$$(۱۳-۳)$$

$$\bar{e}_h = \left[\frac{\bar{e}_p}{\bar{e}_{p0}} \bar{e}_p \Delta \bar{e}_p + \frac{\Delta \bar{e}_p}{\bar{e}_{p0}} \left(-h_{fg} + \int_{t_{ref}}^{t_p} \bar{e}_{p,i} \bar{e} \right) \right] \frac{\bar{e}_{p0}}{\bar{e}}$$

۲-۳- معادلات حاکم

۳-۲-۱- مقدمه

برای ارزیابی تغییر دما در خط مرکزی جت نسبت به فاصله آن به خود جت ، باید تغییرات دما وابسته به زمان و تغییر سرعت بدست آید. از آنجا که تغییرات درجه حرارت قطرات تحت تأثیر اندازه قطرات قرار دارد ، تغییر اندازه قطرات نیز برای بهبود دقت محاسبه در نظر گرفته و محاسبه می شود. در این بخش به بیان معادلات حاکم بر رفتار قطرات در طول مسیر جریان و همچنین تغییرات صورت گرفته در فاز پیوسته پرداخته میشود.

۳-۲-۲- فرضیات

به منظور ساده سازی پدیده های پیچیده و تدوین یک مدل دقیق از حرکت قطرات و تغییر فاز ، سه فرضیه زیر ارائه شده است:

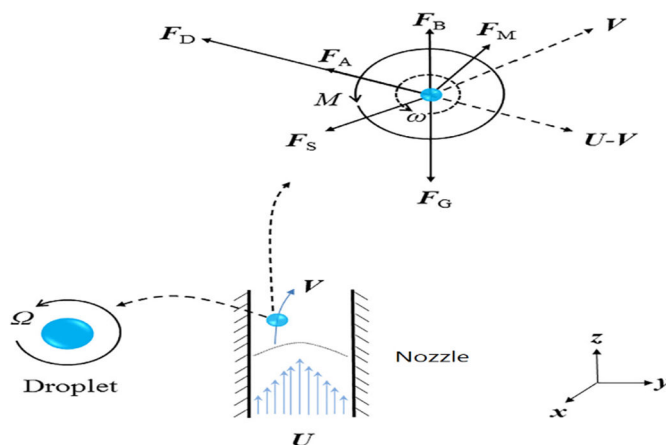
- ۱) دمای درون قطره یکنواخت است. از آنجا که شعاع قطرات اسپری معمولاً کمتر از ۵۰۰ میکرون باشد، عدد بیوت زیر ۰,۱ است بنابراین ، گرادیان دما در داخل قطرات را می توان نادیده گرفت.
- ۲) تبخیر قطرات متقارن است. هنگامی که شعاع قطرات اسپری کوچک باشد، قطرات را می توان به صورت کره های در فرآیند تبخیر در نظر گرفت.
- ۳) انتقال گرمای تابشی را می توان نادیده گرفت. از آنجایی که اختلاف دما بین قطرات و محیط زیاد نیست، می توان از انتقال حرارت تشعشی صرف نظر کرد.

۳-۲-۳- مدل قطره

کل مدل ریاضی، شامل مدل فاز گسسته (قطرات) و فاز پیوسته (گاز) است که در آن مدل فاز گسسته از مدل حرکت قطرات، معادله انتقال حرارت و معادله انتقال جرم تشکیل شده است. معادلات فاز پیوسته شامل معادله پیوستگی، معادله حرکت، معادله انرژی و انتشار گونه ها است.

۳-۲-۴- مدل حرکت قطرات

قطرات متحرک که توسط گاز اطراف آن محاصره و حمل می شود، تحت تأثیر نیروی جاذبه، نیروی جرم اضافی، شناور بودن، نیروی کششی، نیروی بالابر مگنوس^۱ و نیروی بالابر سافمن^۲ قرار خواهد گرفت همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است [۳۴]. کل مدل حرکت قطرات باید شامل معادله جابجایی قطرات، چرخش و سرعت باشد.



شکل (۳-۱) نیروهای وارد بر قطره در جریان هوا [۳۴]

^۱ Magnus lift force

^۲ Saffman lift force

جابجایی قطرات $X(t)$ به شرح زیر است:

$$\frac{dX}{dt} = \omega \quad (14-3)$$

سرعت چرخش قطرات $\omega(t)$ به شرح زیر است:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2}{5} \quad (15-3)$$

در معادله فوق I لحظه ی سکون قطره است و برابر است با $I = \frac{2mr^2}{5}$. M لحظه چرخش در

$$\frac{dM}{dt} = -5 \rho_f \rho_m \omega^5 \left| \frac{\omega - \Omega}{2} \right| \left(\frac{\omega - \Omega}{2} \right)$$

معادله سرعت قطره $v(t)$ به شرح زیر میباشد:

$$\frac{dv}{dt} = v_D + v_A + v_V + v_M + v_S \quad (16-3)$$

لازم به ذکر است در فرآیند پاشش ، میدان جریان گاز غیر یکنواخت است و جریان گاز یک جریان آشفته معمولی است در نتیجه تعداد زیادی گردابه در زمینه جریان به وجود می آید و قطرات تحت تأثیر نیروی بالابر قرار می گیرند، بنابراین لازم است نیروی بالابر مگنوس و نیروی بالابر سافمن را در نظر بگیریم.

۳-۲-۵- تغییرات اندازه قطره

برای محاسبه تغییر اندازه قطرات فرض می شود که تبخیر فقط در سطح جت رخ می دهد. تبخیر سطح قطره را می توان با تبخیر کنترل شده توضیح داد [۳۵].

تغییر جرم قطرات را می توان به شرح زیر بدست آورد:

$$\dot{m} = \frac{\rho}{2} \dot{m}_d \dot{m}^2 \frac{\dot{m}}{\dot{m}} \quad (17-3)$$

میزان کاهش جرم قطره برابر است با:

$$\dot{m} = -2 \dot{m}_d \dot{m}_v \frac{\dot{m}}{\dot{m}} \left(\frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_d} - \frac{\dot{m}_\infty}{\dot{m}_\infty} \right) \quad (18-3)$$

ضریب انتشار $\dot{m}_v$ از نظریه چاپمن-آنسکوگ^۱ محاسبه می شود:

$$\dot{m}_v = \frac{1.86.10^{-3} \dot{m}^3 \left(\frac{2}{\dot{m}} \right)^{\frac{1}{2}}}{\dot{m} \dot{m}^2 \Omega} \quad (19-3)$$

بر اساس معادله (۱۷-۳) و (۱۹-۳) ، تغییر اندازه قطرات در طول زمان می تواند به شرح زیر بدست می آید:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}} = - \frac{4 \dot{m}_v \dot{m}}{\dot{m}_d \dot{m} \dot{m}} \left(\frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_d} - \frac{\dot{m}_\infty}{\dot{m}_\infty} \right) \quad (20-3)$$

برای در نظر گرفتن انتشار جرم در قطره ، یک عامل تصحیح $\emptyset$ ضروری است، این عامل تصحیح را می توان از رابطه زیر بدست آورد که دیویس^۲ ارائه داده است [34].

$$\emptyset = \frac{2 \dot{m} + \dot{m}}{\dot{m} + 5.35 \left(\frac{\dot{m}^2}{\dot{m}} + 3.42 \dot{m} \right)} \quad (21-3)$$

در پایان بیان نهایی تغییر اندازه قطره به شرح زیر میباشد:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}} = - \frac{4 \dot{m}_v \dot{m}}{\dot{m}_d \dot{m} \dot{m}} \left(\frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_d} - \frac{\dot{m}_\infty}{\dot{m}_\infty} \right) = - \frac{4 \dot{m}_v \dot{m}}{\dot{m}_d \dot{m} \dot{m}} \left(\frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_d} - \dot{m} \frac{\dot{m}_\infty^{sat}(\dot{m}_\infty)}{\dot{m}_\infty} \right) \quad (22-3)$$

که فشار بخار اشباع را میتوان از رابطه زیر بدست آورد:

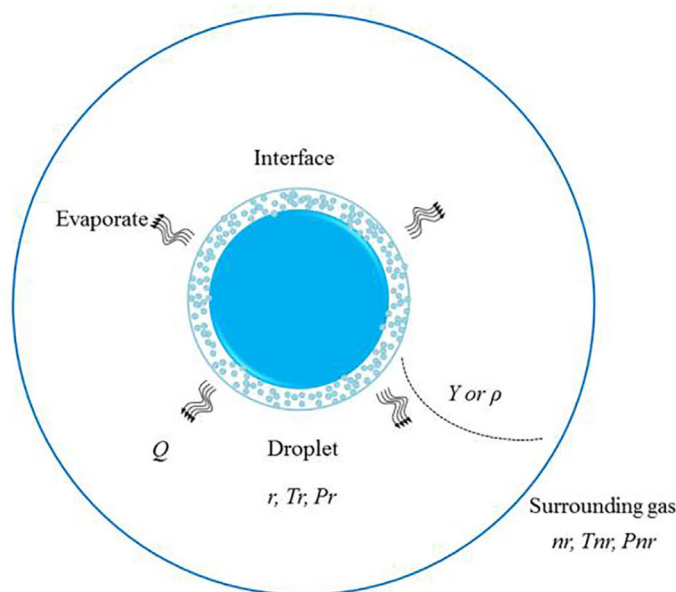
^۱ Chapman– Enskog theory

^۲ Davies

$$p^{sat}(T) = \frac{2}{15} p \left(18.5916 - \frac{3991.11}{T - 39.31} \right) \times 10^3 \quad (23-3)$$

۳-۲-۶- معادله انتقال جرم قطره

شکل زیر طرح تبخیر قطرات در گاز را نشان می دهد ، که در آن شعاع قطرات ، دما ، فشار سطح به ترتیب r ، T_r ، p_r می باشد و دما و فشار گازهای اطراف به ترتیب T_{nr} و p_{nr} در نظر گرفته میشود. لازم به ذکر است که nr موقعیت شعاع قطره در n برابر از مرکز قطرات است. در مطالعات صورت گرفته در اینباره ، پارامترهای سیال معمولاً مشابه جریان آزاد یا در بینهایت در نظر گرفته میشوند به عنوان مثال ، دما و فشار در بینهایت، T_1 و p_1 نامیده میشود، در حالی که تبخیر قطره عمدتاً متأثر از میدان جریان گاز محلی در یک منطقه نفوذ مشخص اطراف قطره است ، به ویژه هنگامی که تعداد زیادی قطره وجود دارد. بر این اساس ، معادله انتقال جرم و گرما باید با استفاده از فرمول نظری بدست آید [۳۴].



شکل (۳-۲) تغییرات قطره در محیط گازی

میزان تبخیر جرم قطرات براساس نظریه انتقال جرم با در نظر گرفتن جریان استفان به صورت زیر نوشته شده است [۳۴].

$$\dot{m} = 4\pi r^2 \rho_v \frac{d}{dt} + \rho_v \dot{V} \quad (۲۴-۳)$$

معادله بالا به صورت زیر ساده سازی شده است:

$$-\frac{d}{dt} \left(\frac{r}{4\pi r_s \rho_v} \right) = \frac{\rho_v}{1 - \rho_v} \quad (۲۵-۳)$$

با انتگرال گیری از معادله (۲۵-۳) در جهت شعاعی و در بازه r تا nr به جواب زیر میرسیم:

$$-\frac{d}{dt} \left(\frac{r}{4\pi r_s \rho_v} \right) \bigg|_r^{nr} = \rho_v (1 - \rho_v) \bigg|_{r_s}^{r_\infty} \quad (۲۶-۳)$$

$$\dot{m} = \frac{r}{r - 1} 4\pi r_s \rho_v \left(\frac{1 - \rho_\infty}{1 - \rho_s} \right) \quad (۲۷-۳)$$

با در نظر گرفتن انتقال جرم همرفت ، میزان انتقال جرم به صورت زیر بیان می شود:

$$\dot{m} = \frac{r}{r - 1} 2\pi r_s \rho_v h r \left(\frac{1 - \rho_\infty}{1 - \rho_s} \right) \quad (۲۸-۳)$$

بنابراین ، میزان تغییر شعاع قطرات را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r}{r - 1} \frac{2\pi h r_s \rho_v}{2\pi d} \left(\frac{1 - \rho_\infty}{1 - \rho_s} \right) = \frac{r}{r - 1} \frac{2\pi h r_s \rho_v}{2\pi d} (1 + \rho_M) \quad (۲۹-۳)$$

ρ_M ، h ، r و Sc در روابط بالا به ترتیب بیانگر مرکز عدد جرم پراکنده، عدد شروود^۱، و عدد اشمیت^۲ و عدد رینولدز^۳ می باشد که به صورت زیر بیان می شوند:

^۱ Sherwood number

^۲ Schmidt number

^۳ Reynolds number

$$\varphi_M = \frac{\varphi_s - \varphi_{\infty}}{1 - \varphi_s} \quad (30-3)$$

$$\varphi h = 2 + .6 \varphi^{.5} \varphi^{\frac{1}{3}} \quad (31-3)$$

$$\varphi = \frac{\varphi}{\varphi_V} \quad (32-3)$$

$$\varphi = \frac{2 \varphi_s \varphi}{\varphi} \quad (33-3)$$

در اینجا ، φ_V ضریب انتشار است ، که با همبستگی تجربی فولر^۴ محاسبه می شود [۳۶].

$$\varphi_V = \frac{1.43 \times 10^{-8} \varphi^{1.75}}{\varphi_{AB}^{\frac{1}{2}} \left[(\Sigma_v)_A^{\frac{1}{3}} + (\Sigma_v)_B^{\frac{1}{3}} \right]^2} \quad (34-3)$$

$$\varphi_{AB} = 2 \left[\left(\frac{1}{\varphi_A} \right) + \left(\frac{1}{\varphi_B} \right) \right]^{-1} \quad (35-3)$$

در رابطه فوق ، Σ_A و Σ_B به ترتیب حجم مولی ماده A و B در واحد φ^3 / φ میباشد.

۳-۲-۷- معادله انتقال حرارت قطره

فرضیات ابتدای فصل بیانگر این است که قطرات کروی باقی مانده و به طور یکنواخت تبخیر می شود، که این نشان می دهد انتقال گرما بین قطره و گاز اطراف آن می تواند به عنوان هدایت گرما یا همرفت از طریق یک پوسته کروی ارائه شود. معادله دیفرانسیل هدایت گرما بدون منبع گرمای داخلی به صورت زیر ارائه شده است [۳۶]

^۴ Fuller

$$\frac{1}{T^2} \frac{dT}{dt} \left(T^2 \frac{dT}{dt} \right) = 0 \quad (36-3)$$

با انتگرال گرفتن از معادله (36-3) در بازه T_1 تا T_2 در جهت شعاعی معادله زیر حاصل میشود:

$$T = T_2 + (T_1 - T_2) \frac{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (37-3)$$

در اینجا دما در موقعیت های T_1 و T_2 برابر است با T_1 و T_2 .

وقتی $T_1 = T$ و $T_2 = T$ باشد، نرخ انتقال حرارت (Q) بدست می آید:

$$Q = \frac{4\pi (T_r - T_{hr})}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}} = \frac{4\pi}{T-1} (T_r - T_{hr}) \quad (38-3)$$

اگر انتقال حرارت همرفت در نظر گرفته شود ، نرخ انتقال حرارت به شرح زیر است:

$$Q = \frac{4\pi}{T-1} 4\pi T^2 h (T_r - T_{hr}) \quad (39-3)$$

سپس ، معادله بقاء انرژی قطره به شرح زیر ارائه می شود:

$$Q_p \frac{dT}{dt} = \frac{4\pi}{T-1} 4\pi T^2 h (T_{hr} - T_r) + Q_d \quad (40-3)$$

از طریق ساده سازی میزان تغییر دمای قطرات به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3}{T_d T_p T} \left[\frac{4\pi}{T-1} h (T_{hr} - T_r) + Q_d \frac{T}{T} \right] \quad (41-3)$$

با توجه به معادلات بالا، مدل قطره پایه را می تواند به صورت زیر خلاصه کرد:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{dt} = T \\ \frac{dT}{dt} = T_1 T_M \left| T - \frac{\Omega}{2} \right| \left(T - \frac{\Omega}{2} \right) \\ \frac{dT}{dt} = T_2 T_D |T - \Omega| (T - \Omega) + T_3 T_{Ma} (T - \Omega) \times \left(T - \frac{\Omega}{2} \right) + T_4 T_{sa} |\Omega|^{-0.5} [(T - \Omega) \times \Omega] + T_5 \\ \frac{dT}{dt} = \frac{4\pi}{T-1} \frac{T h T_s T_V}{2 T_d T} T (1 - T_M) \\ \frac{dT}{dt} = \frac{3}{T_d T_p T} \left[\frac{4\pi}{T-1} h (T_{hr} - T_r) + Q_d \frac{T}{T} \right] \end{array} \right. \quad (42-3)$$

در رابطه (۳-۴۲)، Pr_m ، Pr_f و Pr_w به ترتیب، ضریب چرخش^۱، نیروی پسا^۲، نیروی بالابر مگنوس

و نیروی بالابر سافمن در نظر گرفته شده است

همچنین مقدار ناسلت^۳ و پرانتل^۴ از روابط زیر پیروی میکند [۳۷].

$$\text{Pr}_m = 2 + 0.6 \text{Pr}_f^{1/5} \text{Pr}_w^{1/3} \quad 0 \leq \text{Pr}_m \leq 7 \times 10^4, \quad 0.6 \leq \text{Pr}_f \leq 400 \quad (۳-۴۳)$$

$$\text{Pr}_f = \frac{2h_f}{\text{Pr}_w} \quad (۳-۴۴)$$

$$\text{Pr}_w = \frac{\text{Pr}_m}{\text{Pr}_f} \quad (۳-۴۵)$$

لازم به ذکر است که پارامترهای گازی با روش درون یابی محاسبه می شوند که با استفاده از آن تغییرات لحظه ای میدان جریان گاز محلی و اثرات آنی میدان سیال روی قطره را می توان ردیابی کرد.

۳-۲-۸- معادلات فاز گاز

معادله گاز(هوا) شامل معادله بقاء جرم، معادله بقاء ممنتوم، معادله بقاء انرژی و معادله بقاء گونه ها می باشد [۳۷].

$$\frac{\partial}{\partial t} = \nabla \cdot (\text{Pr}_m \nabla) = \text{Pr}_m \quad (۳-۴۶)$$

^۱ coefficients of the rotation moment

^۲ drag force

^۳ Nusselt number

^۴ Prandtl number

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \nabla \cdot (\rho \phi \vec{u}) = -\nabla \phi + \nabla \cdot \vec{\tau} + \dot{\rho} \phi + \dot{\phi} \quad (47-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\rho E \vec{u} + \vec{q}) = \nabla \cdot \left(\rho \nabla E - \sum h_j \vec{e}_j + (\vec{q}_{eff}) \right) + \dot{E} \quad (48-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi_i) + \nabla \cdot (\rho \phi_i \vec{u}) = -\nabla \cdot \vec{e}_i + \dot{\phi}_i \quad (49-3)$$

$$\vec{e}_j = -\rho D_{jv} \nabla \phi_i \quad (50-3)$$

ρ_m ، ρ_s ، ρ_g به ترتیب ترم منبع جرم^۱، ترم منبع انرژی^۲ و ترم منبع گونه ها^۳ هستند که نشان دهنده تأثیر قطره در میدان سیال گازی است. از آنجا که جریان قطرات در فاز گاز یک جریان آشفته معمولی است، مدل ۲-۲ استاندارد برای شبیه سازی جریان آشفته توسط نرم افزار FLUENT 18.0 اتخاذ شده. عبارات بیان شده به شکل زیر تکمیل شده است.

$$\rho_m = \sum_j \frac{\rho_j}{\rho_{cell}} = \sum_j \frac{\rho_j}{\rho - 1} \frac{2 \rho_s \rho_g h \phi (1 + \rho_M)}{\rho_{cell}} \quad (51-3)$$

$$\rho_E = \sum_j \frac{\rho_j}{\rho_{cell}} = \sum_j \frac{\rho_j}{\rho - 1} \frac{4 \rho_s^2 h (\rho_r - \rho_{hr})}{\rho_{cell}} \quad (52-3)$$

$$\rho_i = \sum_j \frac{\rho_j}{\rho_{cell}} = \sum_j \frac{\rho_j}{\rho - 1} \frac{2 \rho_s \rho_g h \phi (1 + \rho_M)}{\rho_{cell}} \quad (53-3)$$

در تکمیل معادلات بالا باید گفت که آب تنها یک جزء فرار در طول پاشش قطرات آب در هوای محیط است بنابراین، ترم منبع جرم ρ_g برابر است با ترم منبع گونه ρ_g .

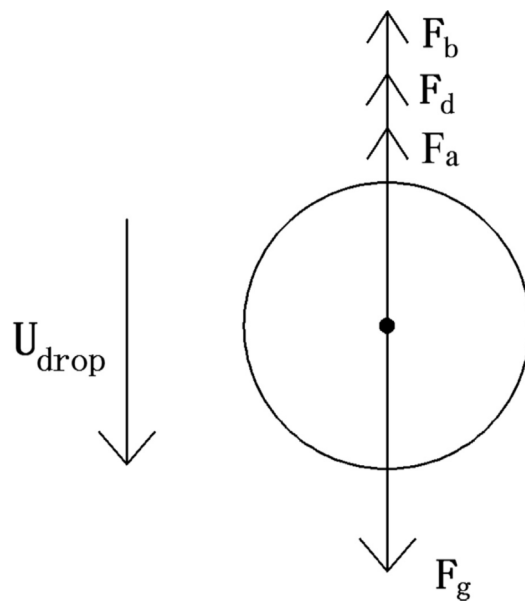
^۱ mass source term

^۲ energy source term

^۳ species source term

۳-۲-۹- تغییرات سرعت قطره

برای سادگی محاسبه ، قطره به عنوان کره ای با خصوصیات حرارتی همگن در نظر گرفته می شود . تجزیه و تحلیل نیرو مربوط به یک قطره منفرد در شکل زیر نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که حرکت قطرات مربوط به جاذبه F_g ، نیروی شناوری F_b ، نیروی پسا F_d و نیروی جرم اضافی F_a است . برای ساده سازی معادلات در این بخش از نیروی بالابر مگنوس و سافمن صرف نظر شده است.



شکل (۳-۳) نیروهای تاثیر گذار بر سرعت قطره

نیروهای تاثیر گذار بر سرعت قطره از روابط زیر پیروی می کنند:

$$F_d = \frac{\rho_v \rho_d U_d^2}{2} \quad (۳-۵۴)$$

$$F_a = \frac{\rho_v^3 \rho_d}{12} \frac{U_d}{\rho} \quad (۳-۵۵)$$

$$F_g = \rho \quad (۳-۵۶)$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_v \quad (57-3)$$

نیروی پسا را می توان از همبستگی زیر بدست آورد:

$$\dot{V}_b = \begin{cases} \frac{24}{\dot{V}_d} & \dot{V}_d < 6.2 \\ 10\dot{V}_d^{-\frac{1}{2}} & 6.2 \leq \dot{V}_d < 500 \\ \frac{24}{\dot{V}_d} (1 + 0.15\dot{V}_d^0.687) & 500 \leq \dot{V}_d < 800 \\ 0.44 & 800 \leq \dot{V}_d < 2 \times 10^5 \\ 0.1 & \dot{V}_d \geq 2 \times 10^5 \end{cases} \quad (58-3)$$

$\dot{V}_d$ به شرح زیر است:

$$\dot{V}_d = \frac{\dot{V}_d \dot{V}}{\dot{V}_v} \quad (59-3)$$

از تجزیه و تحلیل نیروهای وارد بر قطره می توان به رابطه ی زیر رسید:

$$\frac{\dot{V}(\dot{V}_d)}{\dot{V}} = \dot{V}_b - \dot{V}_g - \dot{V}_d - \dot{V}_a \quad (60-3)$$

طبق روابط (3-56) و (3-60) ، تغییر سرعت قطرات در طول زمان را می توان با قطر قطرات اولیه و سرعت شناخته شده بدست آورد .پس از به دست آوردن سرعت قطرات ، مسافت طی شده قطره را در یک زمان معین می توان از طریق رابطه ی زیر حساب کرد:

$$\dot{V} = \int_0^t \dot{V}_d(\dot{V}) \dot{V} \quad (61-3)$$

۳-۲-۱۰- تغییرات دمای قطره

معادله بقاء انرژی برای قطره را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\dot{V}(\dot{V}_d \dot{V}_a)}{\dot{V}} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 + \dot{V}_4 \quad (62-3)$$

انتقال حرارت هدایتی را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q} \dot{Q}^2 \dot{Q} \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}} \quad (63-3)$$

از آنجا که اندازه قطرات آب کوچک است ، می توان گرادیان دما را ساده کرد:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}} = - \frac{\dot{Q}_d - \dot{Q}_\infty}{\frac{\dot{Q}}{2}} \quad (64-3)$$

انتقال حرارت جابجایی توسط رابطه ی زیر برای قطره بیان می شود:

$$\dot{Q}_2 = -\dot{Q} \dot{Q}^2 h (\dot{Q}_d - \dot{Q}_\infty) \quad (65-3)$$

همچنین معادله انتقال حرارت تشعشعی به صورت زیر است:

$$\dot{Q}_3 = -\dot{Q} \dot{Q}^2 \dot{Q} (\dot{Q}_d^4 - \dot{Q}_r^4) \quad (66-3)$$

انتقال حرارت ناشی از تبخیر به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\dot{Q}_4 = \dot{Q} h_{fg} \quad (67-3)$$

برای فراهم کردن نتایج دقیق و کافی، هدایت گرمایی موثر به منظور اصلاح هدایت گرمایی واقعی در این بخش مورد استفاده قرار می گیرد با توجه به یافته های آبرامزون^۱ و سیریگانو^۲، رسانایی حرارتی موثر را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد [11].

$$\dot{Q}_{eff} = 1.86\dot{Q} + 0.86\dot{Q} \tanh \left[2.245 \log 10 \left(\frac{\dot{Q} \dot{Q}_d}{30} \right) \right] \quad (68-3)$$

معادله ی نهایی بقاء انرژی به صورت زیر ارائه شده است:

^۱ Abramzon

^۲ Sirignano

$$\frac{\rho_d(\rho_d \rho_d \rho_d)}{\rho} = \rho_d^2 \rho_{eff} \frac{\rho}{\rho} - \rho_d^2 \rho (\rho_d^4 - \rho_r^4) - \rho h_{fg} \quad (69-3)$$

از آنجا که گرمای نهان برای تبخیر بستگی به دما دارد ، گرمای پنهان h_{fg} را می توان از معادله زیر بدست آورد.

$$h_{fg} = 2.501 \times 10^6 - 2.369 \times 10^3 \times (T - 273.15) + 2.678 \times 10^{-1} \times (T - 273.15)^2 - 8.103 \times 10^{-3} \times (T - 273.25)^3 - 2.079 \times 10^{-5} \times (T - 273.15)^4 \quad (70-3)$$

پس از به دست آوردن دمای قطرات، اختلاف دمای بی بعد به شرح زیر تعریف می شود:

$$\rho_{l,ave} = \frac{\rho_{l,ave} - \rho_s}{\rho_{l,0} - \rho_s} = \frac{\rho_{l,ave} - \rho_s}{\Delta \rho} \quad (71-3)$$

دمای متوسط بی بعد به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho_{l,ave} = \frac{3}{4 \rho_d^3} \int_0^{R_d} \rho_d(\rho, \rho) 4 \rho^2 \rho \quad (72-3)$$

فصل ۴:

روش حل و نتایج

با توجه به اهمیت زیاد جلوگیری از تشکیل ذرات به صورت قطرات مایع در کاربری های تهویه مطبوع و صنعت و لزوم بهینه سازی جریان برای دستیابی به شرایط مطلوب تر، لازم است شناخت دقیقتری از رفتار ذرات مایع تحت تاثیر میدان جریان سیال (جریان های چندفازی) داشته باشیم. از این رو با بررسی کارهای که در گذشته توسط محققان مختلف صورت گرفته بود پرداختیم و متوجه شدیم که، تحلیل های آزمایشگاهی و عددی این پدیده بسیار دشوار و با محدودیت های زیادی روبرو است. به همین علت، تحقیقات در زمینه تبخیر و برخورد قطرات همچنان یکی از چالش های بزرگ در علم مکانیک می باشد.

در تحقیقات صورت گرفته توسط محققان مشخص گردید که تحقیقات زیادی بر میزان تاثیر پارامتر های مختلف از قبیل سرعت هوای محیط و قطر قطرات بر روی رفتار جریان و میزان تبخیر انجام نشده و هر یک با فرض های مختلف مانند: ثابت بودن هوای محیط، غیر قابل حل بودن قطرات در سیال محیط، سقوط قطره فقط در یک جهت و ... به بررسی تبخیر قطره پرداخته اند و به همین دلیل محور اصلی تحقیق حاضر بررسی میزان تاثیر سرعت هوای محیط و همچنین میزان قطر قطرات اولیه بر تبخیر و رفتار جریان می باشد. با بررسی های صورت گرفته مشخص گردید آقای صدفی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به تحقیق بر روی تاثیر استفاده آب شور (جریان ۳ فاز) در برج های خنک کننده خشک با اسپری پرداختند [۳۹]. آنها توانستند یک مدل CFD برای بررسی تبخیر، انتقال و طول مرطوب قطره (فاصله از نازل که در آن تمام قطرات به خاطر تبخیر خشک می شوند) را توسعه دهند. به طور کلی اهداف تحقیق آنها را می توان به ۴ بخش زیر تقسیم بندی کرد:

۱. توسعه یک مدل CFD برای پیش بینی طول مرطوب قطرات آب شور در خنک کاری اسپری

برای شرایط محیطی مختلف

۲. اعتبار سنجی مدل با استفاده از داده های تجربیشان

۳. انجام یک آزمایش عددی برای توصیف اثرات توزیع اسپری و زاویه مخروط بر طول مرطوب

۴. پیشنهاد یک همبستگی جدید برای طول مرطوب در کانال های خشک برای کمک به

طراحی سیستم های اسپری آب شور

طبق مطالعات صورت گرفته توسط صدفی و همکاران، دمای هوای محیط بیشترین تاثیر بر تغییرات قطره را داراست و دیگر عوامل تاثیر کمتری دارند. با توجه به کارهای صورت گرفته توسط صدفی و همکاران مقاله آن ها به عنوان مقاله مبنا در شبیه سازی های تحقیق حاضر انتخاب گردید.

۴-۲- روش حل

به منظور شبیه سازی عددی پدیده های هیدرودینامیکی، روش حجم کنترل به دلیل پوشش کامل تغییرات زیاد سطح مشترک و سادگی ارایه آن و همچنین مصرف نه چندان زیاد پردازنده، روش محبوبی می باشد. در این مطالعه به دلیل وجود جریان چند فاز از روش لاگرانژ-ویلری استفاده شده و به این معناست که فاز پیوسته با حل معادلات ناویر-استوکس و فاز گسسته با رهگیری ذرات در طول مسیر کنترل میشوند.

معادلات حاکم بر حل مسئله حاضر به ۲ دسته تقسیم می شوند:

۴-۲-۱- معادلات حاکم بر فاز پیوسته

معادلات حاکم بر هوا شامل معادله بقاء جرم، معادله بقاء ممنتوم، معادله بقاء انرژی و معادله بقاء گونه ها می باشد که به طور کلی به صورت زیر عنوان می گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t} = \nabla \cdot (\vec{v} \vec{\rho}) = \vec{v}_m \quad (1-4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{f} \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho(\vec{v} + \vec{u})) = \nabla \cdot \left(\rho \nabla \phi - \sum h_j \vec{e}_j + (\vec{e}_{eff} \rho) \right) + \rho_E \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_i \vec{v}) = -\nabla \cdot \vec{\tau}_j + \rho_i \quad (4-4)$$

$$\vec{e}_j = -\rho \nabla_v \frac{\rho \vec{v}_i}{\rho} \quad (5-4)$$

۴-۲-۲- معادلات حاکم بر فاز گسسته

معادلات فاز گسسته نیز مانند فاز پیوسته بوده با این تفاوت که معادله ی بقاء گونه ها در آن دخیل نمی باشد و به طور ساده به صورت زیر نوشته می شود.

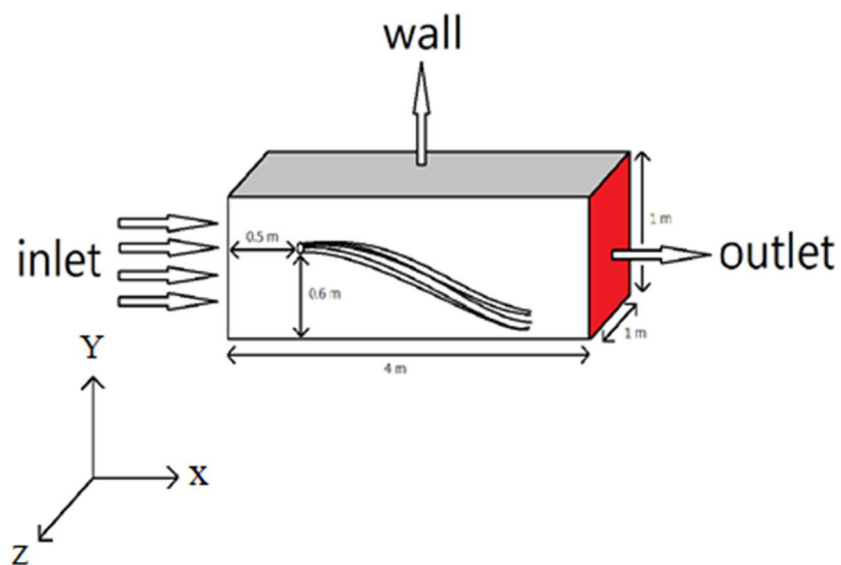
$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (6-4)$$

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (7-4)$$

$$\rho \nabla_p (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \rho \nabla^2 \vec{v} + \rho (\nabla^2 \vec{v}) \quad (8-4)$$

۴-۳- هندسه

همانطور که در شکل (۴-۱) مشاهده میشود هندسه یک تونل باد مکعب مستطیل با عمق ۴ متر و طول و عرض ۱ متر می باشد. محل اسپری ذرات نیز در عمق ۰,۵ متری از ورودی و ۰,۱ متر بالاتر از مرکز ورودی می باشد [۳۹].

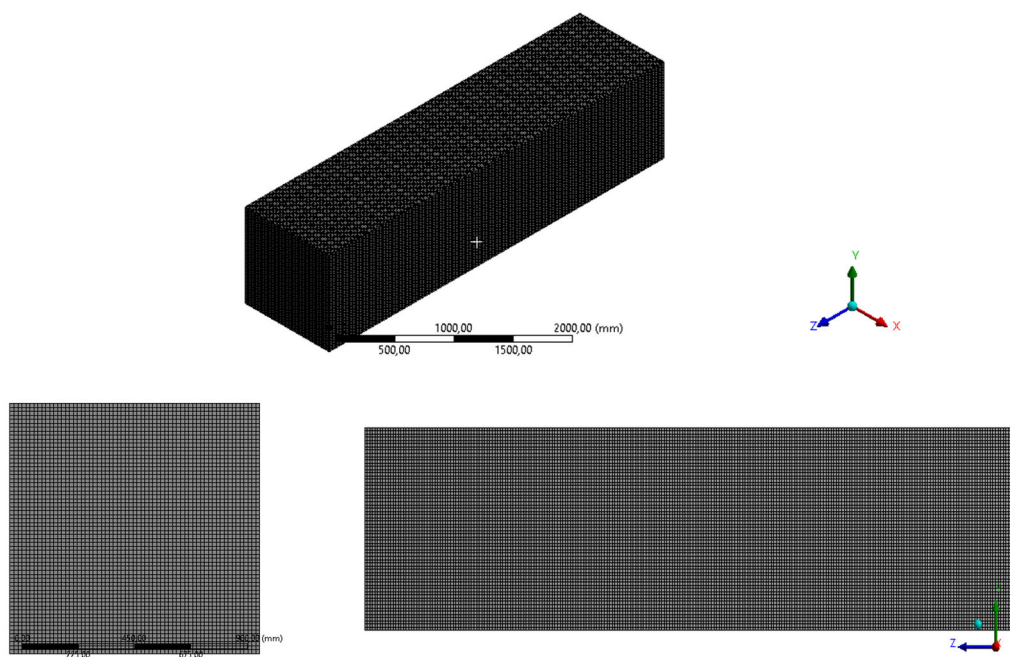


شکل (۴-۱) هندسه مورد استفاده در تحقیق حاضر

۴-۴- شبکه بندی

شکل (۴-۲) نشاندهنده ی نوع شبکه در تحقیق حاضر می باشد و طبق گفته صدفی و همکاران تعداد

شبکه های مورد نیاز برای این هندسه ۱۰۲۸۰۹۶ می باشد.



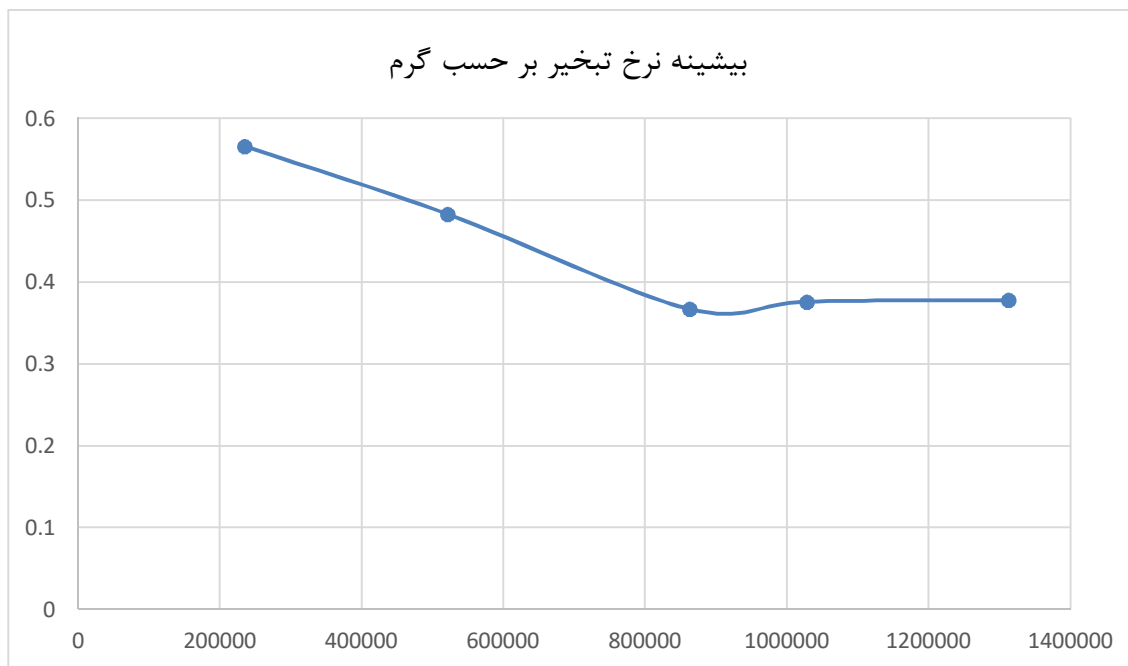
شکل (۲-۴) نوع شبکه به کار رفته در تحقیق حاضر

۴-۴-۱- کیفیت و استقلال از شبکه

به دلیل عدم پیچیدگی و یکنواختی هندسه مقدار کیفیت به دست آمده یک می باشد که نشانگر بهترین حالت ممکن برای شبیه سازی حاضر می باشد.

جدول (۱-۴) استقلال حل از شبکه

تعداد سلول	بیشینه نرخ تبخیر بر حسب گرم	درصد تبخیر
234758	0.566	14.8
521432	0.483	12.76
862448	0.367	9.76
1028096	0.376	10
1312346	0.378	10.05



نمودار (۴-۱) استقلال حل از شبکه

با توجه به اینکه افزایش تعداد شبکه از ۱۰۲۸۰۹۶ تاثیر کمی بر نرخ تبخیر دارد، تعداد شبکه ۱۰۲۸۰۹۶ برابر با تعداد شبکه در مقاله مبنا انتخاب گردید.

۴-۵- مدل آشفستگی

مدل آشفستگی k-epsilon ، مدلی دو معادله ای است. مدل های آشفستگی دو معادله ای را میتوان زیر بنای بسیاری از مطالعات در حوزه جریان های توربولانس نامید. مدل K-Epsilon در عین ساده بودن، تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد که منجر به استفاده از آن در اغلب شبیه سازی ها می شود. مدل های آشفستگی دو معادله ای در انسیس فلوئنت دارای یک متغیر ثابت به نام K یا معادله انتقالی برای انرژی جنبشی توربولانس می باشند. ضرایب مدل (SKE) Standard k-ε بر اساس نتایج تجربی استخراج گردیده است که می توان این ضرایب را برای تطبیق بهتر این مدل با شبیه سازی تغییر داد. مدل آشفستگی K-epsilon Standard یکی از مشهورترین و پرکاربردترین مدل های دو معادله ای

آشفتگی است و کاربرد وسیعی دارد. حتی در بسیاری از موارد اغلب کاربران انسیس فلوئنت در قدم اول، از این مدل برای شبیه سازی خود استفاده می کنند. در تحقیق حاضر نیز به علت مناسب بودن این مدل برای جریان های چند فازی در تنظیمات حل نیز از این روش برای حل مدل آشفتگی استفاده گردید.

۴-۶- شبیه سازی فاز گسسته

در تحقیق حاضر از روش DPM برای شبیه سازی قطرات آب پاششی به محیط استفاده گردید. یکی از مهمترین روش های لاگرانژی- اویلری، مدل فاز گسسته DPM می باشد که در این متد فاز پیوسته با استفاده از معادلات ناویراستوکس حل می شود. در حالیکه فاز گسسته از روی رهگیری تعداد زیادی از ذرات، حباب ها و یا قطرات عبوری از میدان جریان پیوسته محاسبه شده شبیه سازی می شود. لازم به توضیح است که فاز گسسته می تواند با فاز پیوسته تبادل ممنت، جرم و انرژی داشته باشد. این روش با نادیده گرفتن اندرکنش ذرات (و همچنین قطرات و حباب ها) با یکدیگر بسیار ساده تر هم می شود. البته این مهم زمانی اتفاق می افتد که فاز گسسته حتی با وجود داشتن جرم زیاد، از حجم بسیار کمتری (کمتر از ۱۰ درصد) نسبت به فاز پیوسته برخوردار باشد. پس از هر تکرار از محاسبات فاز پیوسته مسیرهای ذرات (همینطور حباب ها یا قطرات) بطور جداگانه و مستقل محاسبه و مشخص می شود.

۴-۷- شرایط مرزی

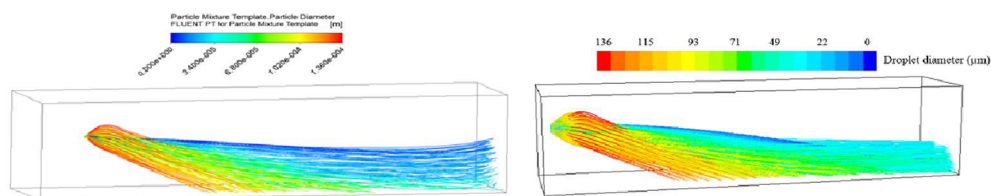
شرایط مرزی در فلوئنت، متغیرهای حرارتی و جریان سیال را روی مرزهای دامنه محاسباتی را مشخص میکند. بنابراین تعیین شرایط مرزی در انسیس فلوئنت یک موضوع حساس در شبیه سازی عددی جریان سیال بوده و تعریف مناسب آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

برای ورودی هوا شرط سرعت ورودی (velocity inlet) با سرعت ۰,۷۷ متر بر ثانیه و دمای ۲۹۸ درجه سانتی گراد اعمال گردید.

شرایط مرزی دیوار برای دیوارهای تونل با شار حرارتی صفر و شرایط بدون لغزش بر دیواره ها اعمال گردید ، همچنین شرایط دیوار در DPM به حالت فرار (escape) تنظیم شده است. شرایط برای خروجی تونل، فشار خروجی (pressure outlet) انتخاب و فشار خروجی با فشار محیط مطابقت دارد.

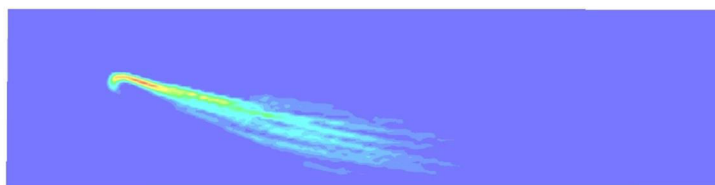
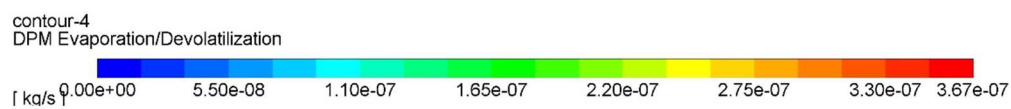
۴-۸- صحت سنجی

شکل (۴-۴) سمت راست خطوط جریان سیال مایع و توزیع قطر قطرات می باشد که توسط صدفی و همکاران به دست آمده. شکل سمت چپ خطوط جریان و متوسط توزیع قطر قطرات بدست آمده از شبیه سازی می باشد. با توجه به عدم اشاره مقاله مبنا به برخی از تنظیمات حل و مقادیر متغیر ها ، وجود خطا در شبیه سازی غیر قابل انکار می باشد.

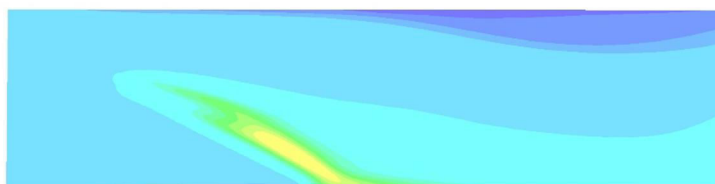
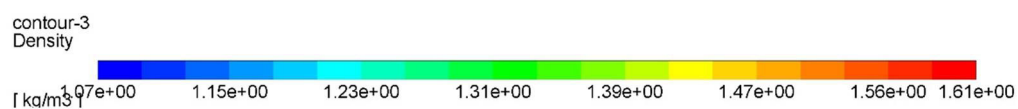


شکل (۴-۳) خطوط جریان و توزیع قطر قطرات

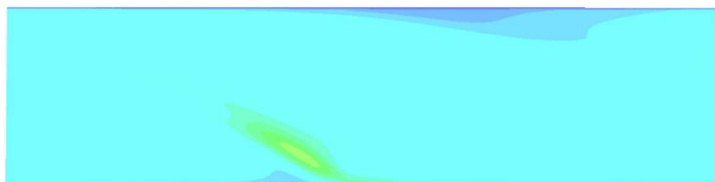
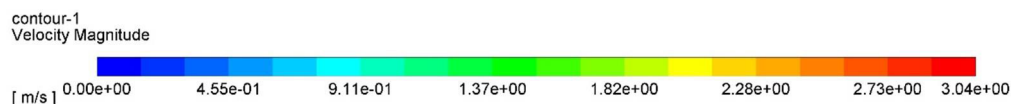
در ادامه دیگر نتایج حاصل از شبیه سازی مقاله مبنا در تحقیق حاضر نشان داده می شود.



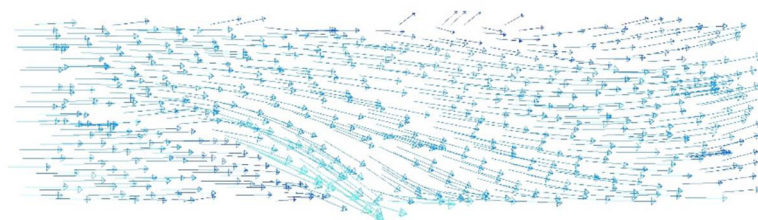
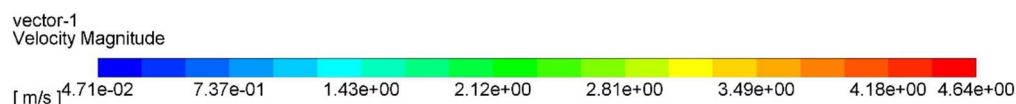
شکل (۴-۴) کانتور فاز گسسته



شکل (۴-۵) کانتور چگالی



شکل (۴-۶) کانتور سرعت



شکل (۴-۷) بردار سرعت

تمامی نتایج بالا نشاندهند ی شبیه سازی جریان مخلوط نمک و آب می باشد میزان غلظت نمک مخلوط در آب ۳ درصد جرمی می باشد و نمک در انتهای مسیر با توجه به تبخیر آب به شکل جامد مشاهده می شود. شبیه سازی نشان میدهد که پس از عبور از یک فاصله کوتاه (تقریباً ۰,۱ متر) جریان به طور قابل توجهی تحت تاثیر جاذبه قرار میگیرد که این امر کاملاً با نتایج مقاله مبنا منطبق می باشد. طبق یافته ای صدفی و همکاران میزان تبخیر آب به دلیل وجود نمک زیاد نمی باشد که

این گفته نیز با نتیجه بدست آمده در گزارش نرم افزار در جدول (۴-۱) صحیح می باشد. رفتار قطرات اسپری شده که شامل مخلوط آب با نمک می باشد به این گونه است که وقتی یک قطره در معرض هوا با دمای بالاتر قرار میگیرد شروع به کوچک شدن میکند(تبخیر) تا اینکه نمک به غلظت بحرانی برسد، سپس یک پوسته خشک جامد شکل میگیرد، در حالی که هسته مرطوب در مرکز کوچک می شود. برای محدود کردن خطر خوردگی و رسوب، نازل ها باید در فاصله ایمن از سطوح فلزی نصب شوند تا اطمینان حاصل شود که تمام قطرات قبل از تماس با سطوح خشک هستند.

میزان تبخیر ۶۰ قطره به ازای هر ۶۰۰ قطره می باشد که به معنای تبخیر ۱۰٪ می باشد انطباق خوبی بین نتایج نرم افزاری تحقیق حاضر و نتایج مقاله صدفی می باشد. لذا می توان با استناد به این انطباق تنظیمات دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفته در این شبیه سازی (اعم از استقلال حل از شبکه، روش کوپل سرعت و فشار، مدل آشفتگی و ...) را درست دانست و با تغییر شرایط مرزی سایر حالت ها را مورد بررسی قرار داد. سایر حالات شبیه سازی شده در تحقیق حاضر به شرح زیر است:

۱. سرعت هوا ۰/۷۷ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۲ میلیمتر
۲. سرعت هوا ۰/۷۷ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۰۵ میلیمتر
۳. سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۱ میلیمتر
۴. سرعت هوا ۰/۳۸۵ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۱ میلیمتر

فصل ۵:

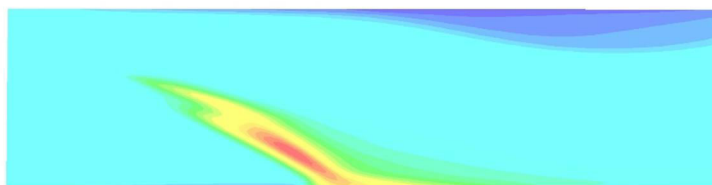
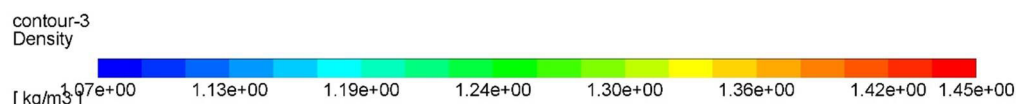
بررسی نتایج و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

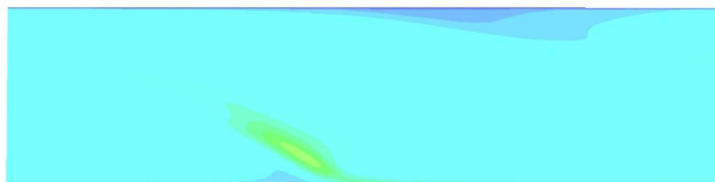
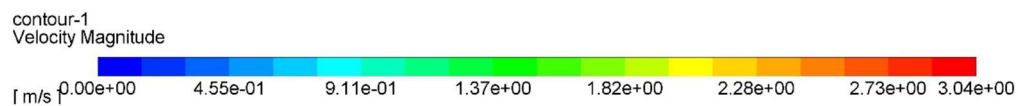
در این فصل به ارائه نتایج حاصل از شبیه سازی اسپری پرداخته خواهد شد. این شبیه سازی ها در چهار حالت انجام شد. حالت های مختلف با افزایش و کاهش قطر قطرات و سرعت هوا ایجاد می شود و تاثیر هر یک در مقدار تبخیر و همچنین نوع شکست قطرات بر حسب عدد نمودار های عدد رینولدز و عدد وبر بدست آمده است. نتایج در هر بخش به طور مجزا نمایش داده شده است.

۵-۲- سرعت هوا ۰/۷۷ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۲ میلیمتر

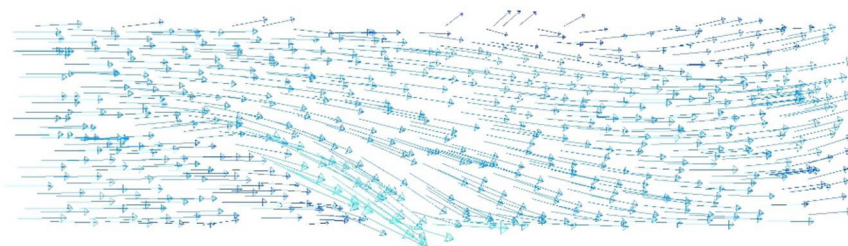
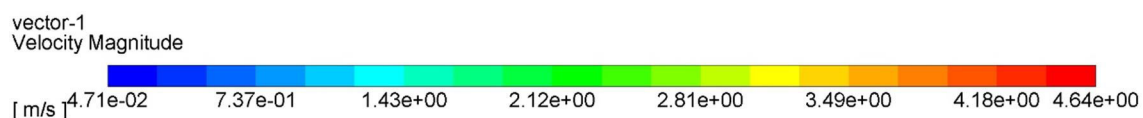
با نگاهی به کانتور سرعت و چگالی می توان دریافت که در نقاطی که میزان چگالی زیاد است، میزان سرعت نیز بیشتر می باشد که این امر به دلیل این است که در نقاطی که میزان چگالی زیاد است کسر جرمی قطرات نیز زیاد می باشد و سرعت قطرات نسبت به سرعت هوای محیط بیشتر می باشد.



شکل (۵-۱) کانتور چگالی



شکل (۲-۵) کانتور سرعت

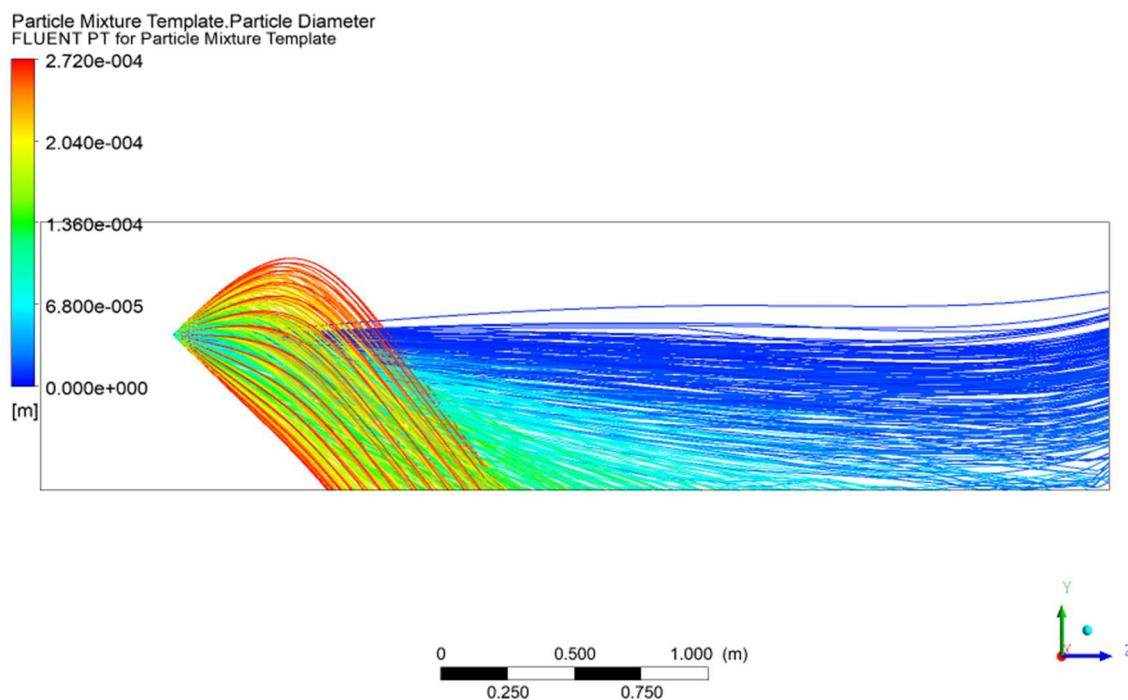


شکل (۳-۵) بردار سرعت

در شکل (۱-۵) مشاهده می شود که میزان چگالی در میانه ی جریان قطرات نسبت به نقاط دیگر جریان بیشتر است زیرا قطرات در میانه جریان کمتر تحت تاثیر عوامل محیطی قرار میگیرند در نتیجه قطراتی که به مرکز جریان نزدیک هستند نسبت به قطراتی که از مرکز جریان دور هستند، میزان تبخیر شونگی کمتری دارند.

مقدار تبخیر قطرات ۲۹ قطره به ازای ۶۰۰ قطره ی اسپری شده می باشد، یعنی کاهش ۲ برابری تبخیر قطرات در نتیجه ی افزایش ۲ برابری قطر اولیه قطرات که این به معنای انطباق خوب نتایج با اصول حاکم بر دینامیک سیالات می باشد.

در شکل (۴-۵) مشاهده می شود که با افزایش قطر قطرات، قطرات بزرگتر از ۲۰۰ میکرون در فاصله ۱،۲ متری از نازل کاملاً از جریان قطرات جدا شده و به دیواره ی پایینی محیط برخورد میکنند که این امر تحت تاثیر نیروی گرانشی صورت میگیرد.

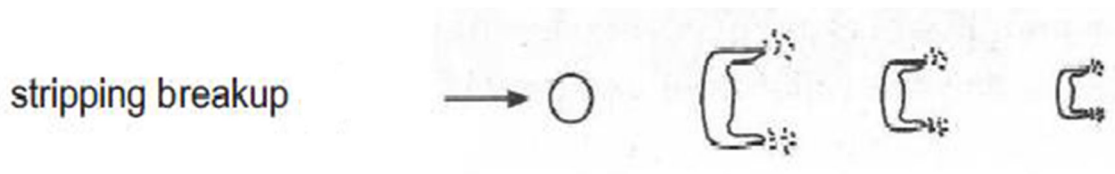


شکل (۴-۵) خطوط جریان و قطر قطرات

با توجه به عدد وبر می توان نوع شکست قطرات را به وسیله معادله زیر بدست آورد و عدد وبر برای بزرگترین قطره در این شرایط و نوع شکست قطره به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{Q}{Q} = \frac{Q^2}{Q^2} \quad (5-1)$$

$$Q = 320$$

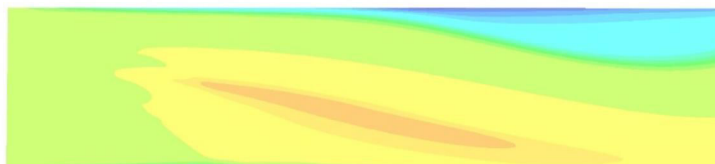


شکل (۵-۵) نوع شکست بزرگترین قطره

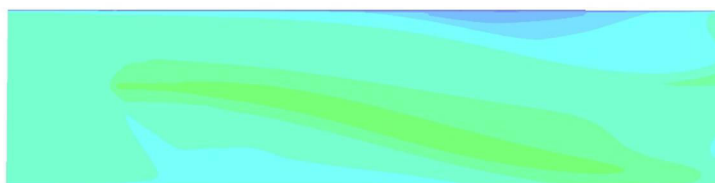
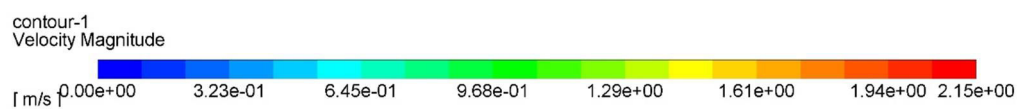
با توجه به نوع شکست بزرگترین قطره که از نوع شکست ورقه ای می باشد می توان دریافت که به غیر از شکست تخریبی دیگر شکست ها نیز در قطرات قابل رویت خواهد بود

۵-۳- سرعت هوا ۰/۷۷ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۰۵ میلیمتر

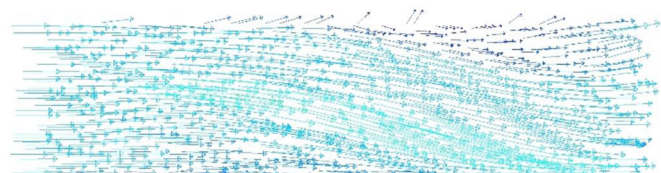
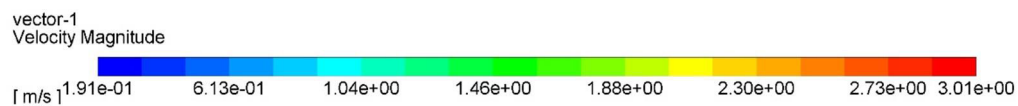
کاهش قطر قطرات باعث افزایش تاثیر عوامل محیطی بر رفتار و تغییرات قطرات میگردد که همان گونه که در شکل (۵-۹) مشاهده می شود در فاصله ۲ متری از نازل متوسط قطر قطرات تقریباً کمتر از ۲۰ میکرون می باشد، همچنین مقدار تبخیر در نتیجه کاهش قطر اولیه قطرات ۱۶۰ قطره به ازای ۶۰۰ قطره ی اسپری شده است. بردار سرعت نیز بیانگر این است که بیشتر تغییرات سرعت و جهت تغییرات در نیمه ی پایینی تونل اتفاق می افتد.



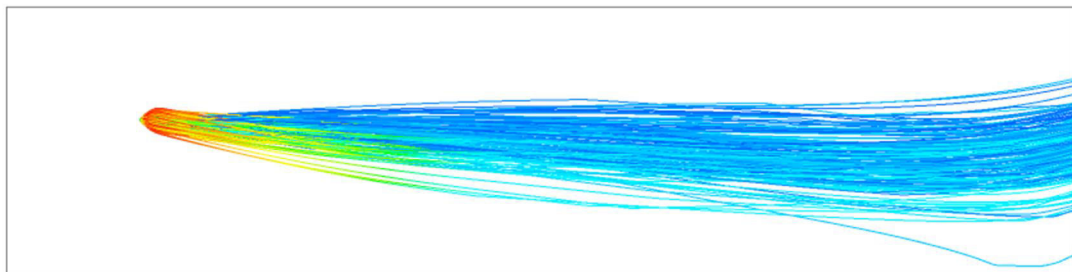
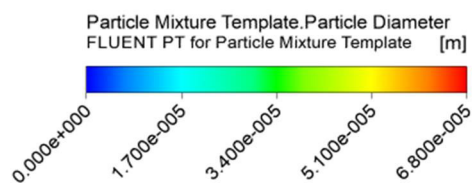
شکل (۵-۶) کانتور چگالی



شکل (۵-۷) کانتور سرعت



شکل (۸-۵) بردار سرعت

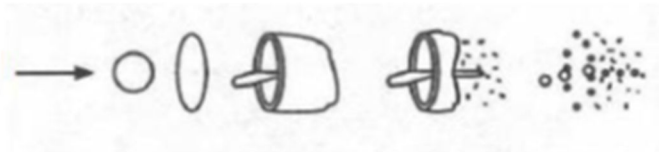


شکل (۹-۵) خطوط جریان و توزیع قطر قطرات

نوع شکست قطرات با توجه به عدد وبر برای بزرگترین قطره و با شرایط گفته شده برابر است با:

$$We = 80$$

bag/streamer breakup



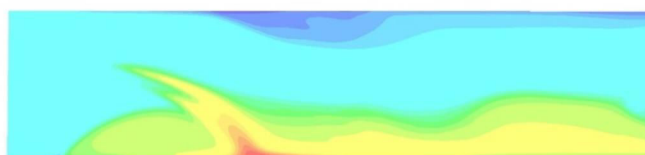
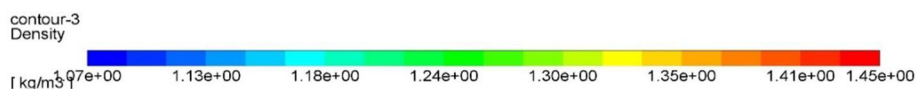
شکل (۵-۱۰) نوع شکست بزرگترین قطره

عدد ویر ۷۸ بیانگر این است که شکست های رخ داده برای قطرات از نوع لرزشی، کیسه ای و کیسه-پرچمی می باشد و هیچ شکست ورقه ای یا تخریبی در قطرات رخ نخواهد داد.

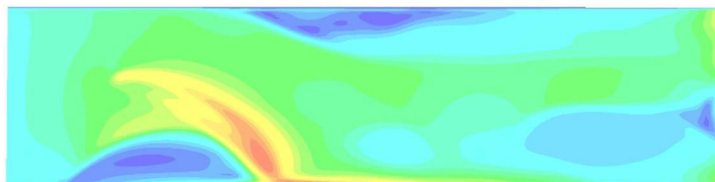
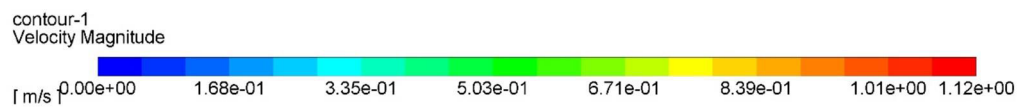
۵-۴- سرعت هوا ۰,۳۸۵ متر بر ثانیه و قطر متوسط قطرات ۰,۱ میلیمتر

در این بخش از شبیه سازی سرعت هوا ۲ برابر کاهش و میزان تبخیر به اندازه ی ۵٪ نسبت به شبیه سازی مبنا افزایش پیدا کرده و مقدار آن ۹۰ قطره در ۶۰۰ قطره می باشد.

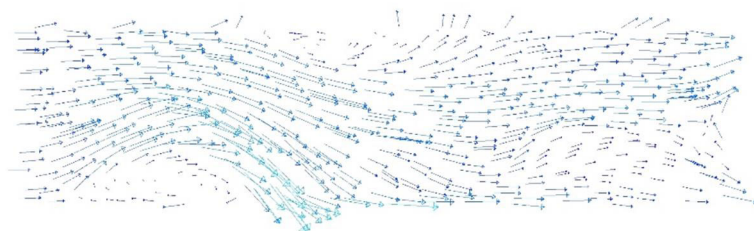
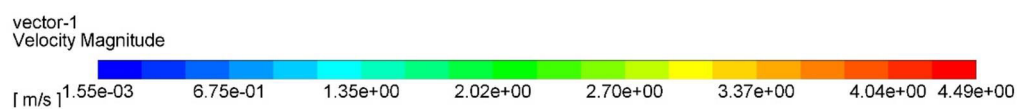
یکی از مشکلات کاهش سرعت هوا در این بخش این بود که قطرات آب پس از پیمودن فاصله حداکثر ۱,۵ متری از نازل به دیواره ی پایینی برخورد کرده و قطرات با قطر بزرگتر از ۳۴ میکرومتر از حالت جریان به صورت معلق در هوا خارج می شوند. همچنین در این حالت قطراتی که به دیواری پایینی برخورد کرده اند در طول مسیر روی قطرات بالاتر تاثیر گذاشته و در نتیجه باعث حرکت قطرات کوچکتر به سمت بالا در انتهای مسیر می شوند.



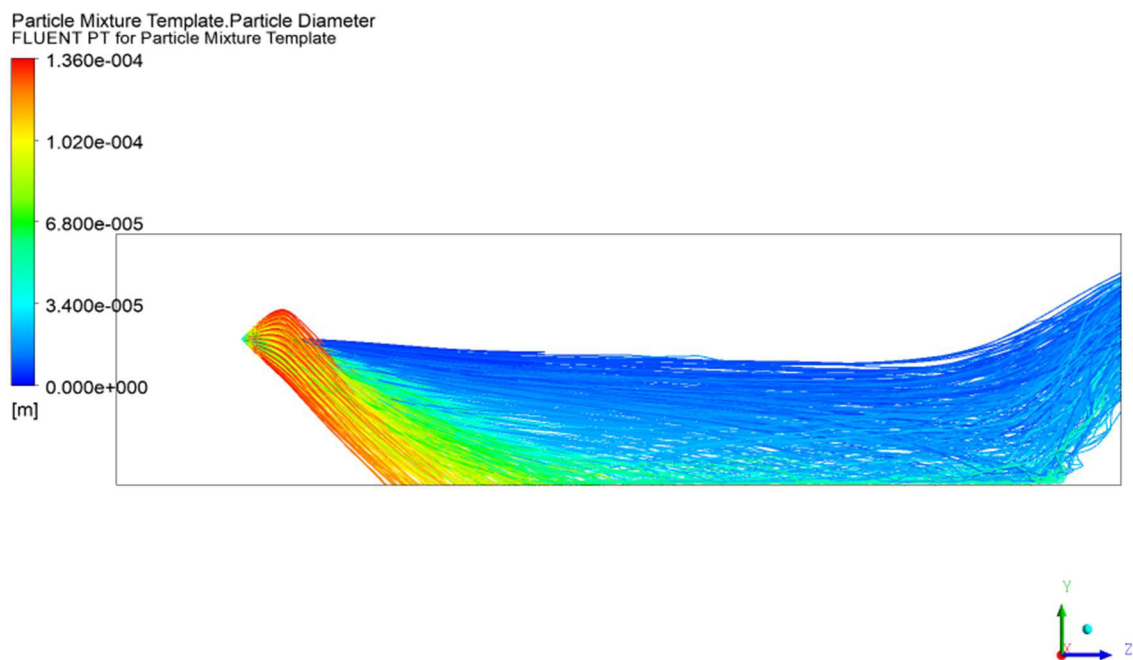
شکل (۵-۱۱) کانتور چگالی



شکل (۵-۱۲) کانتور سرعت



شکل (۵-۱۳) بردار سرعت



شکل (۵-۱۴) خطوط جریان و توزیع قطر قطرات

عدد وبر و نوع شکست قطرات با توجه به شرایط مرزی و اینکه سرعت هوا تاثیری بر مقدار عدد وبر در ناحیه سرعت قطرات ندارد برابر است با:

$$We = 160$$

stripping breakup

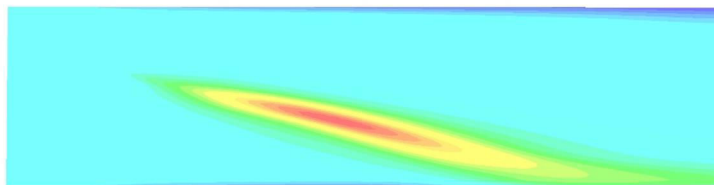
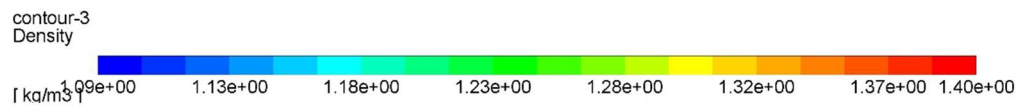


شکل (۵-۱۵) نوع شکست بزرگترین قطره

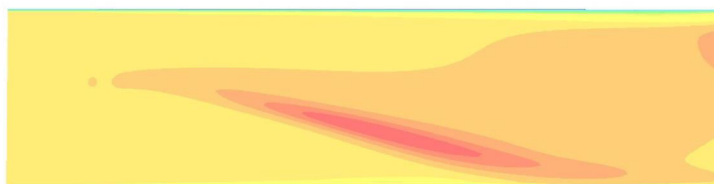
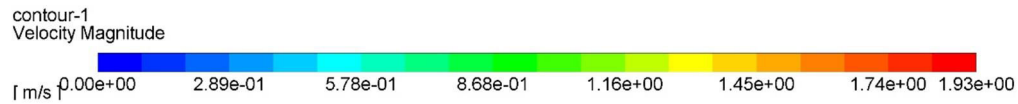
۵-۵- سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه، قطر متوسط قطرات ۰,۱ میلیمتر

در نگاه اول انتظار می رود که افزایش سرعت هوا باعث افزایش انتقال حرارت و در نتیجه باعث افزایش تبخیر گردد اما با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه سازی ها مشخص شد که افزایش سرعت نه تنها باعث افزایش انتقال حرارت نشد بلکه باعث کاهش آن گردید و این موضوع می تواند بیانگر آن باشد

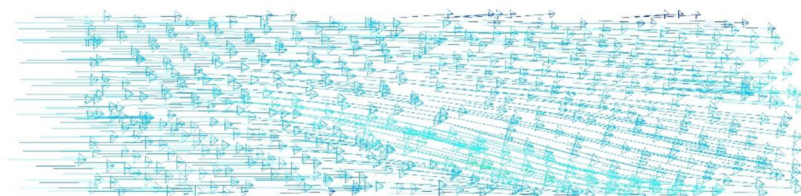
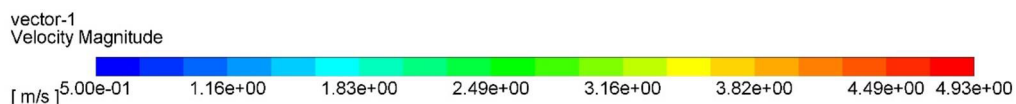
که سرعت هوا تا یک حدی باعث افزایش راندمان سیستم خنک کاری می شود و با عبور از سرعت حد ، میزان راندمان کاهش می یابد.



شکل (۵-۱۶) کانتور چگالی

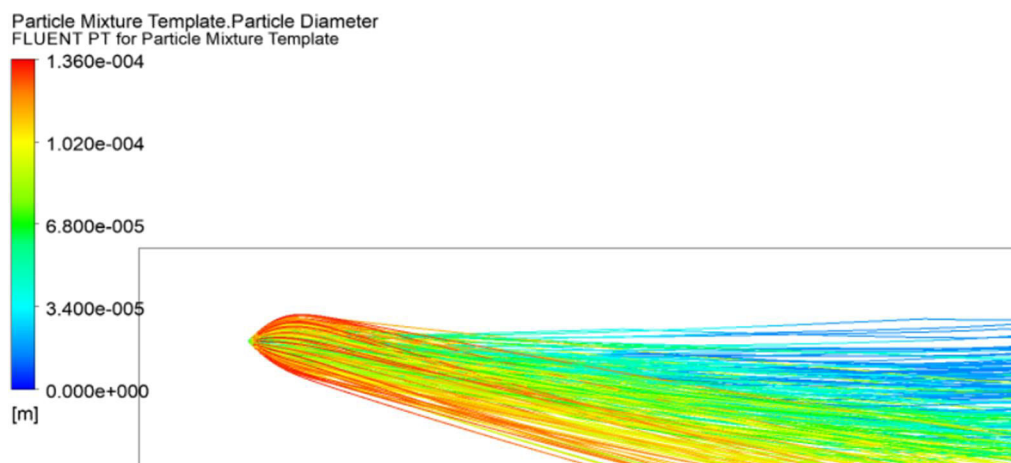


شکل (۵-۱۷) کانتور سرعت



شکل (۵-۱۸) بردار سرعت

مقدار تبخیر ۳۰ قطره در ۶۰۰ قطره می باشد. مشاهده می شود که میزان تبخیر قطرات کاهش پیدا کرده و میزان این کاهش تبخیر با میزان افزایش سرعت رابطه ی مستقیم دارد یعنی با ۲ برابر کردن سرعت هوا، میزان تبخیر قطرات نیز به اندازه ی ۲ برابر کاهش خواهد داشت.



شکل (۵-۱۹) خطوط جریان و قطر قطرات

عدد وبر بزرگترین قطره برای این شبیه سازی که در این حالت نیز سرعت هوا تاثیری بر عدد وبر در ناحیه سرعت قطرات ندارد برابر است با:

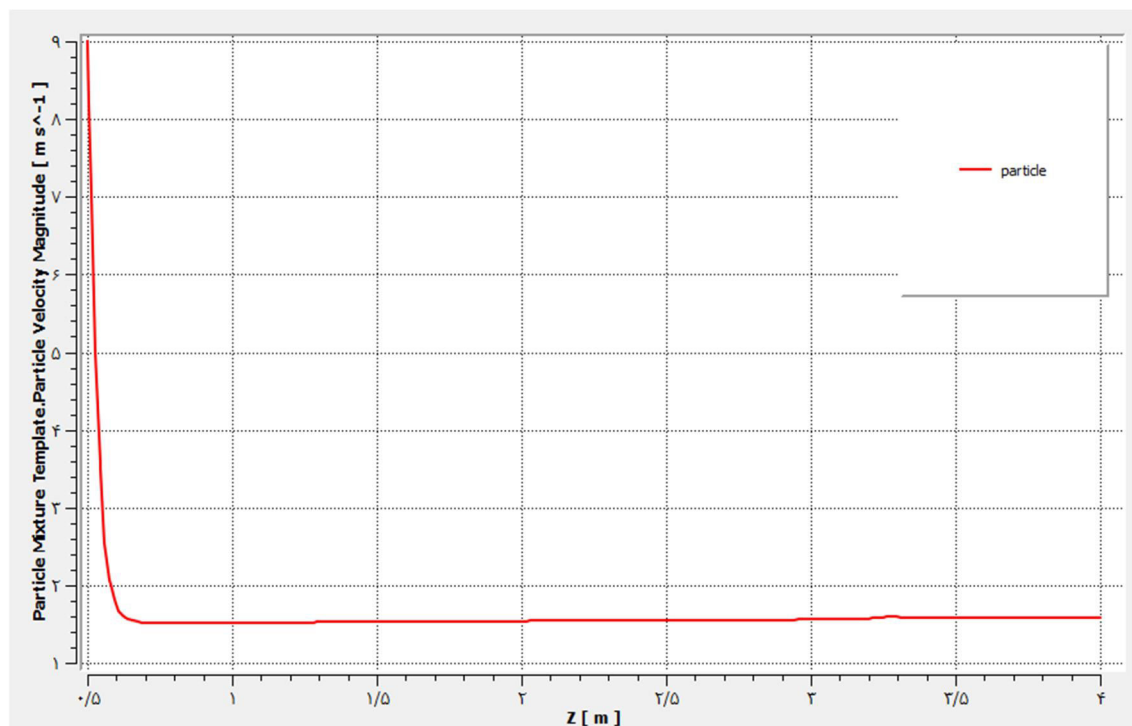
$$We = 160$$

stripping breakup

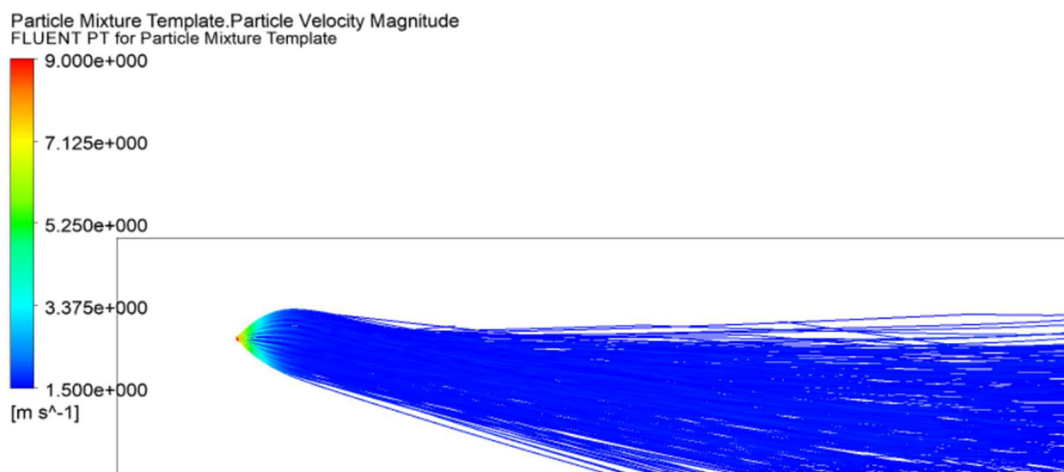


شکل (۵-۲۰) نوع شکست بزرگترین قطره

در این پاشش نیز شکست ورقه ای برای بزرگترین قطره رخ خواهد داد و تغییر سرعت هوا تاثیری بر مقدار عدد وبر نخواهد داشت زیرا قطرات با سرعت ۹ متر بر ثانیه پس از پیمودن ۱۰ سانتیمتر از نازل به سرعت هوا خواهند رسید در نتیجه ما دو ناحیه با شرایط مختلف خواهیم داشت اولی ناحیه سرعت قطرات و طول ۱۰ سانتیمتر و دومی ناحیه سرعت هوا و طول ۳,۴۰ متر که نمودار (۵-۱) و شکل (۵-۲۱) بیانگر این موضوع می باشد. لازم به ذکر است که تغییرات سرعت از ناحیه قطرات به ناحیه سرعت هوا در طول کمتر از ۱۰ سانتیمتر می باشد که در تحقیق حاضر به دلیل ثابت بودن سرعت در ۱۰ سانتیمتر از نازل از این مقدار فاصله برای جدا سازی دو ناحیه استفاده و در ادامه مقادیر عدد وبر و رینولدز در هر ناحیه گزارش شده است.



نمودار (۵-۱) سرعت قطرات در طول ناحیه حل

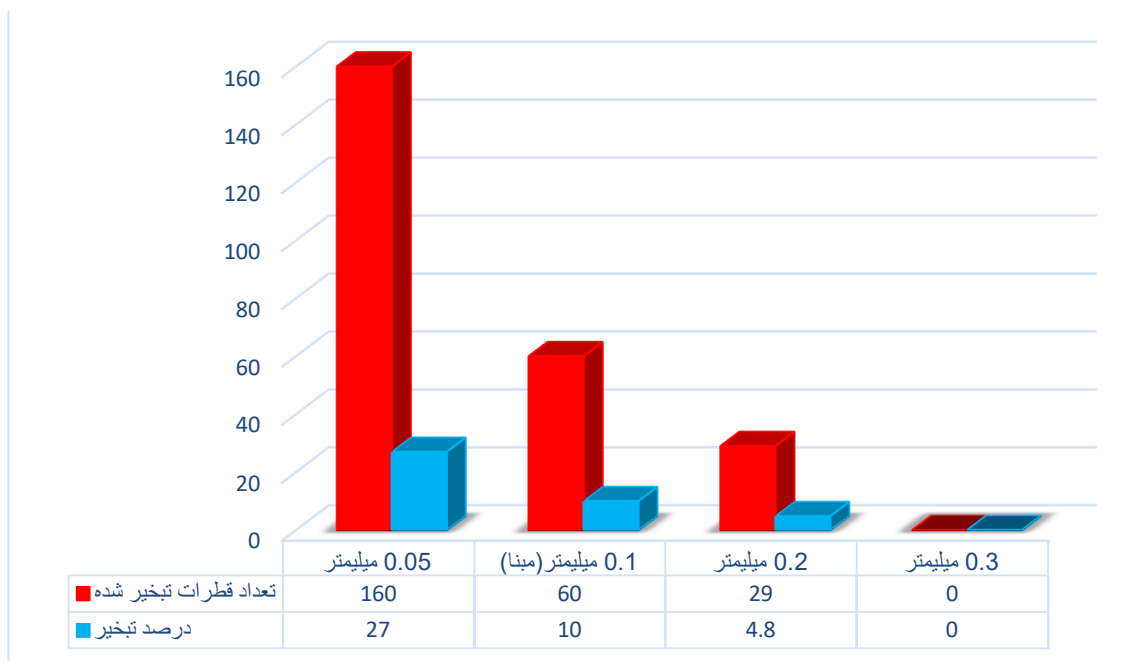


شکل (۵-۲۱) توزیع سرعت در قطرات

۵-۶- تاثیر قطر اولیه بر تبخیر

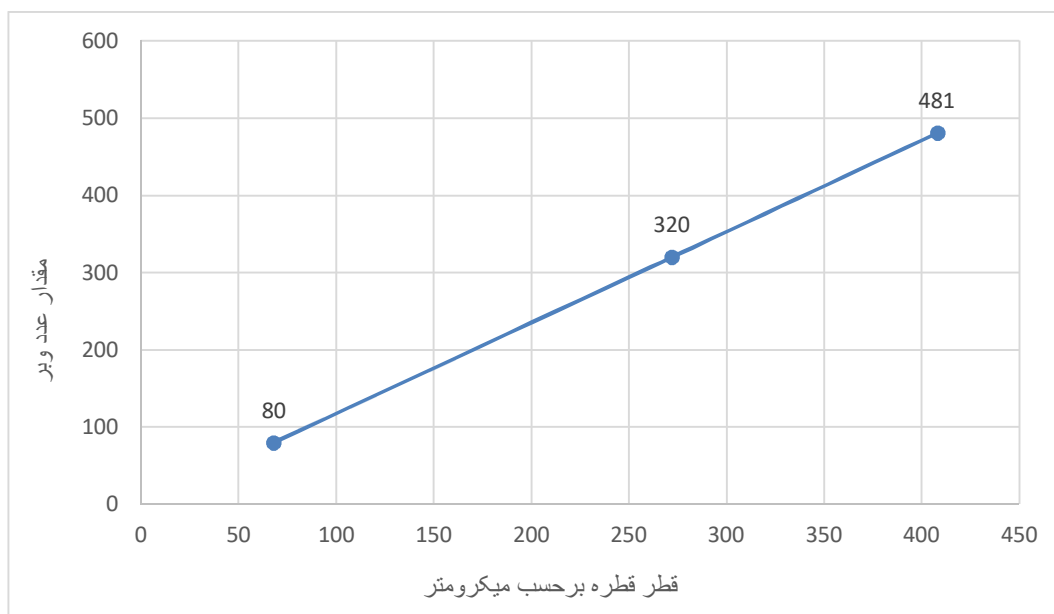
با توجه با نتایج بدست آمده و مطالب گفته شده کاملاً مشهود است که قطر قطرات با مقدار تبخیر رابطه بلعکس دارد. نتایج بدست آمده در نمودار (۵-۲) نسبت به نتایج مبنا سنجیده می شوند در جدول زیر مشاهده می شود که کاهش قطر قطرات تاثیر بلقوه ای در میزان تبخیر قطرات دارد و با کاهش ۵۰ درصدی قطر اولیه میزان تبخیر ۱۷ درصد نسبت به مقدار مبنا افزایش میابد که بالاترین تاثیر در بین نتایج مربوط به قطر قطرات می باشد.

در شبیه سازی بعدی قطر قطرات به میزان ۲ برابر افزایش دادیم که این افزایش باعث کاهش تقریباً ۵۰ درصدی مقدار تبخیر شد که این امر طبق اصول حاکم بر دینامیک سیالات دور از انتظار نبود. در آخرین شبیه سازی نیز قطر اولیه ۳ برابر یعنی ۰٫۳ میلیمتر تعیین شد که نتایج بدست آمده بیانگر این است که هیچگونه تبخیری در طول مسیر جریان صورت نگرفته. لازم به ذکر است به دلیل افزایش قطر اولیه میزان تاثیر نیروی گرانش نیز افزایش پیدا می کند و این امر باعث می شود قطرات میل بیشتری به سقوط آزاد در راستای گرانش پیدا کنند یعنی قطرات پس از پیمودن مسیر کوتاهی به دیواره پایینی برخورد میکنند.

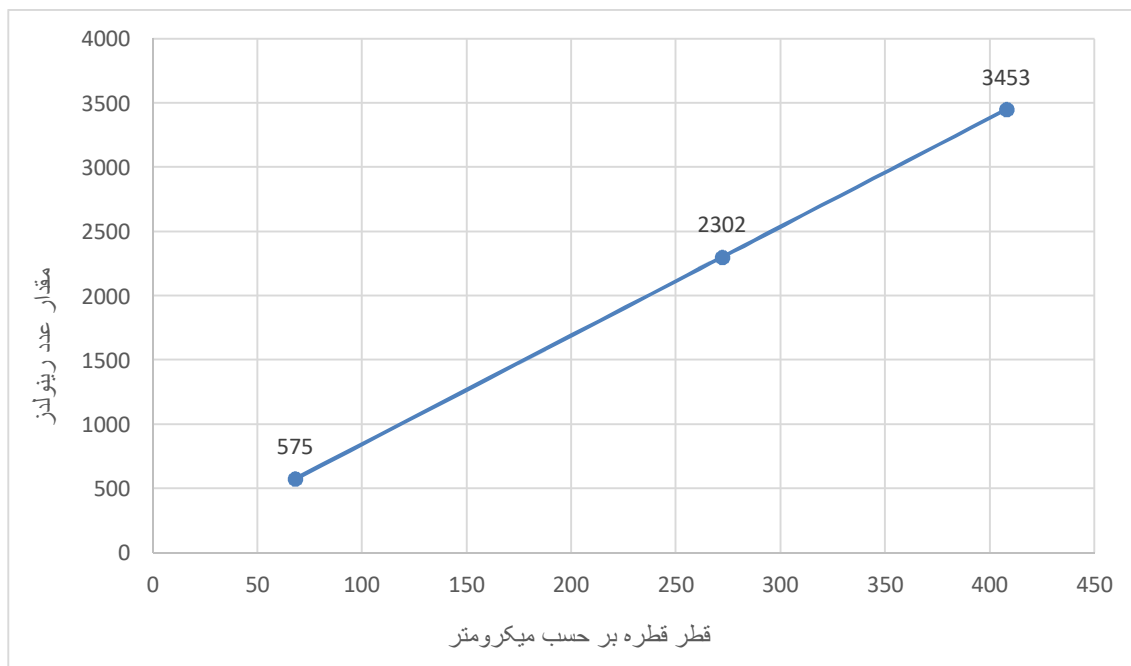


نمودار (۲-۵) نتایج قطر اولیه بر تبخیر

در نمودار (۳-۵) مقادیر عدد وبر و نمودار (۴-۵) مقادیر عدد رینولدز قطره بر حسب قطر قطرات گزارش شده که همانطور که مشاهده می شود مقدار عدد وبر و رینولدز با قطر قطره رابطه مستقیم داشته و با افزایش قطر قطره مقدار آن به صورت خطی افزایش می یابد.

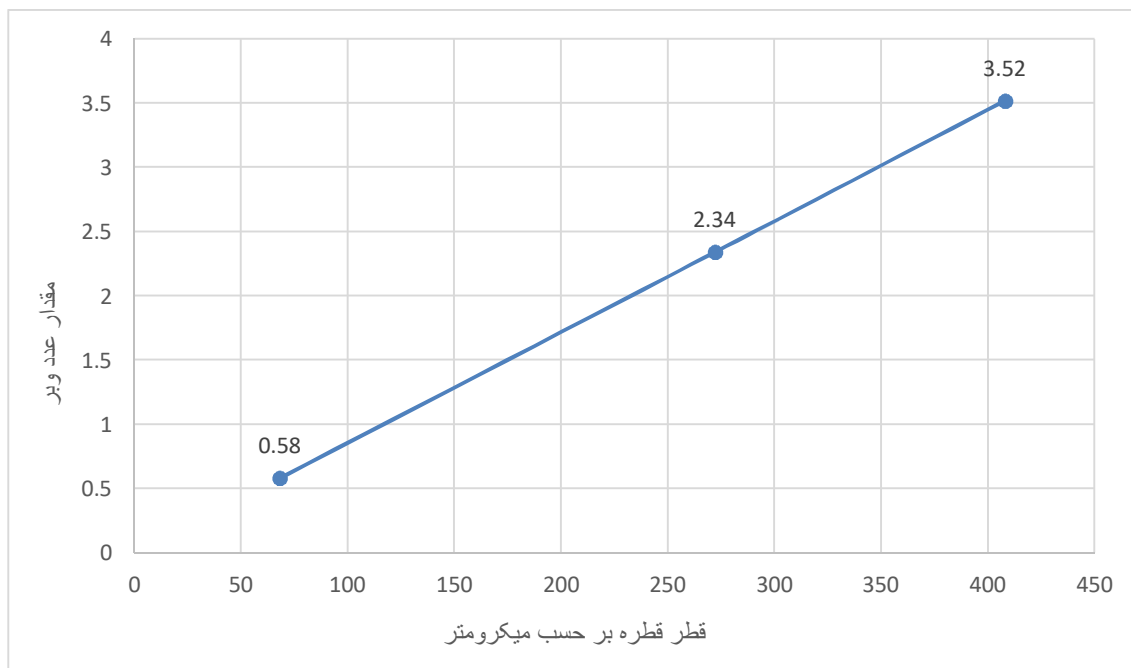


نمودار (۳-۵) عدد وبر بر حسب قطر قطره در ناحیه سرعت قطرات

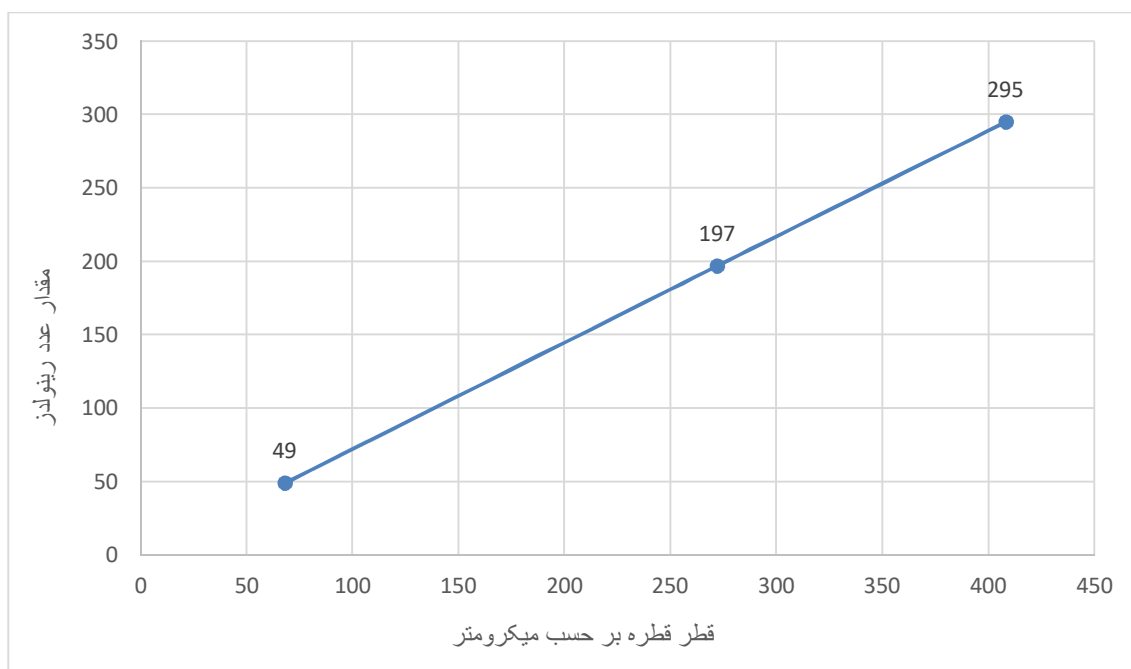


نمودار (۴-۵) عدد رینولدز بر حسب قطر قطره در ناحیه سرعت قطرات

نمودار (۵-۵) نشانگر تغییرات عدد وبر و نمودار (۶-۵) بیانگر تغییرات عدد رینولدز قطره در ناحیه سرعت هوا و در بلافاصلگی ناحیه قبل می باشد که مشاهده می شود مقادیر وبر و رینولدز به شدت تحت تاثیر سرعت هوا قرار گرفته و مقادیر آن نسبت به ناحیه قبل که سرعت قطره متأثر از سرعت خودش بود ۱۱,۷ برابر کاهش یافته است.



نمودار (۵-۵) عدد وبر بر حسب قطر قطره در ناحیه سرعت هوا



نمودار (۵-۶) عدد رینولدز بر حسب قطر قطره در ناحیه سرعت هوا

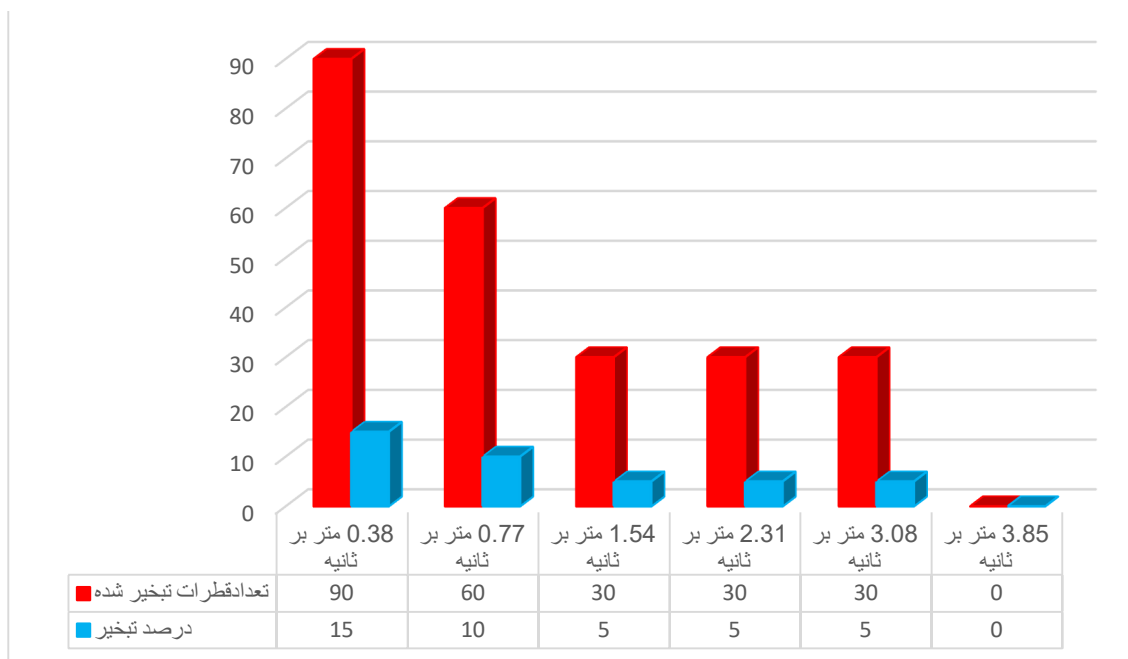
۷-۵- تاثیر سرعت هوا بر تبخیر

در این بخش به مقدار تاثیر سرعت جریان هوا بر تبخیر پرداخته شده و نتایج بدست آمده با نتایج مبنا مقایسه می شوند.

با نگاهی به نمودار (۷-۵) می توان دریافت که سرعت هوا یکی از عوامل مهم در مقدار تبخیر قطرات می باشد. در این نمودار نیز مقادیر بدست آمده از شبیه سازی ها با مقادیر مبنا سنجیده می شوند. با کاهش ۲ برابری سرعت هوا، درصد تبخیر مانند کاهش ۲ برابری قطر اولیه، افزایش پیدا کرده اما مقدار این افزایش ۵٪ بیشتر از مقدار مبنا و ۱۲٪ کمتر از تاثیر قطر اولیه می باشد.

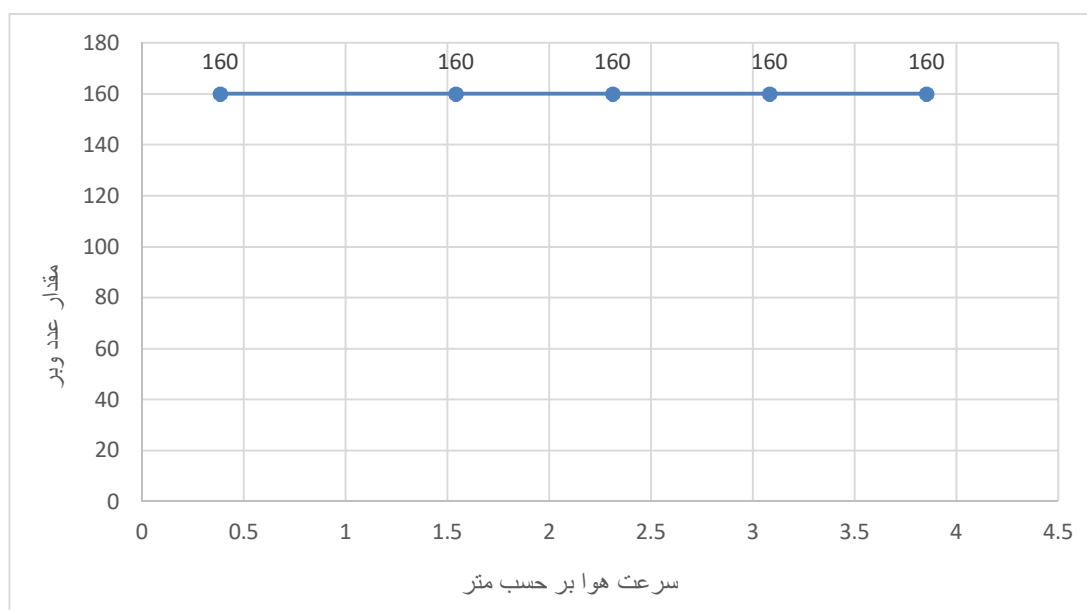
در اعمال شرایط بعدی مقدار سرعت هوا را به میزان ۲ برابر یعنی ۱,۵ متر بر ثانیه افزایش دادیم و نتایج حاکی از کاهش ۵٪ درصد تبخیر بود و این نشاندهنده ی این است که سرعت هوا فقط تا یک مقدار معین باعث افزایش درصد تبخیر میگردد و با عبور از این مقدار تبخیر ثابت یا کاهش خواهد یافت.

در آخرین شبیه سازی مقدار سرعت هوا ۳ برابر سرعت مبنا قرار گرفت که نتایج آن می تواند حاکی از اثبات گفته های قبل باشد. با افزایش سرعت در نمودار (۷-۳) می توان مشاهده کرد که درصد تبخیر مانند درصد تبخیر سرعت هوای ۱,۵ متر بر ثانیه می باشد یعنی مقدار تبخیر قطرات با افزایش سرعت هیچ تغییری نکرد و سرعت در بازه ی ۱,۵ تا ۲,۳۱ متر بر ثانیه هیچ تاثیری بر مقدار تبخیر ندارد و افزایش بیشتر سرعت می تواند باعث کاهش تبخیر گردد. طبق بررسی های صورت گرفته برای بدست آوردن سرعت لازم جهت عدم تبخیر در شبیه سازی سرعت هوا را تا ۴ برابر مقدار مبنا افزایش دادیم و نتایج نشان داد که درصد تبخیر همانند سرعت ۳ برابر می باشد و ۵درصد تبخیر وجود دارد به همین علت سرعت را بار دیگر افزایش و ۵ برابر یعنی ۳,۸۵ متر بر ثانیه قرار دادیم که در این حالت مقدار تبخیر به صفر رسید.

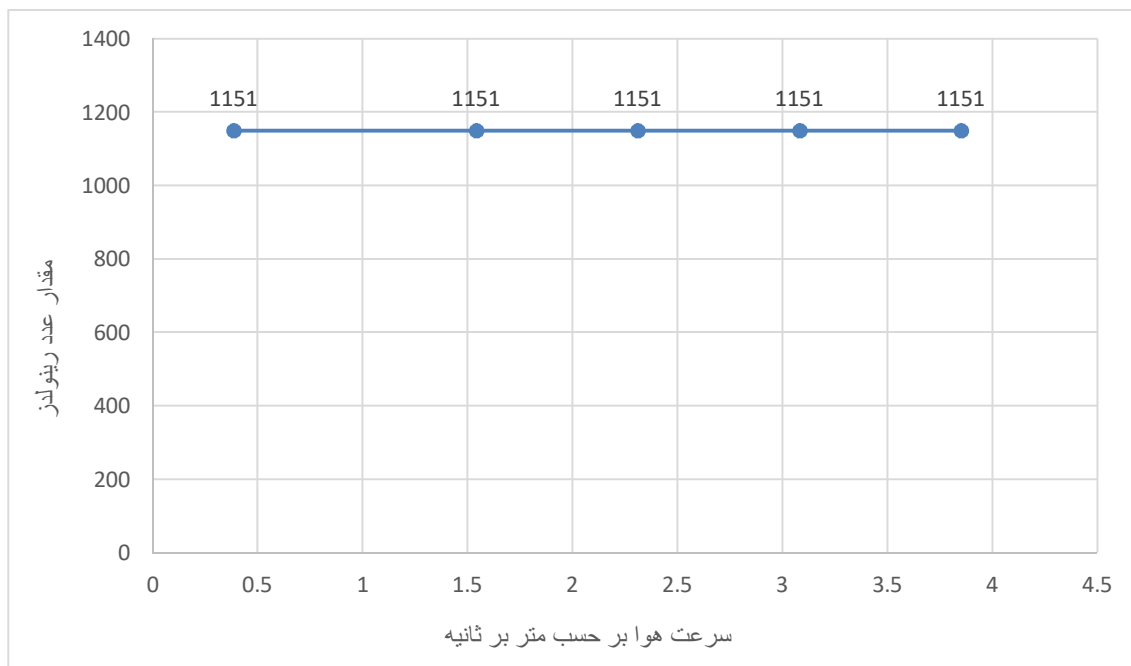


نمودار (۷-۵) نتایج تاثیر سرعت هوا بر تبخیر

نمودار (۸-۵) و (۹-۵) نشانگر عدد وبر و رینولدز در ناحیه سرعت قطرات می باشد و همانطور که مشاهده می شود تغییرات سرعت هوا اگر کمتر از سرعت خود قطره باشد تاثیری بر مقادیر وبر و رینولدز در ناحیه سرعت قطرات نداشته و همواره دارای یک مقدار ثابت خواهد بود.

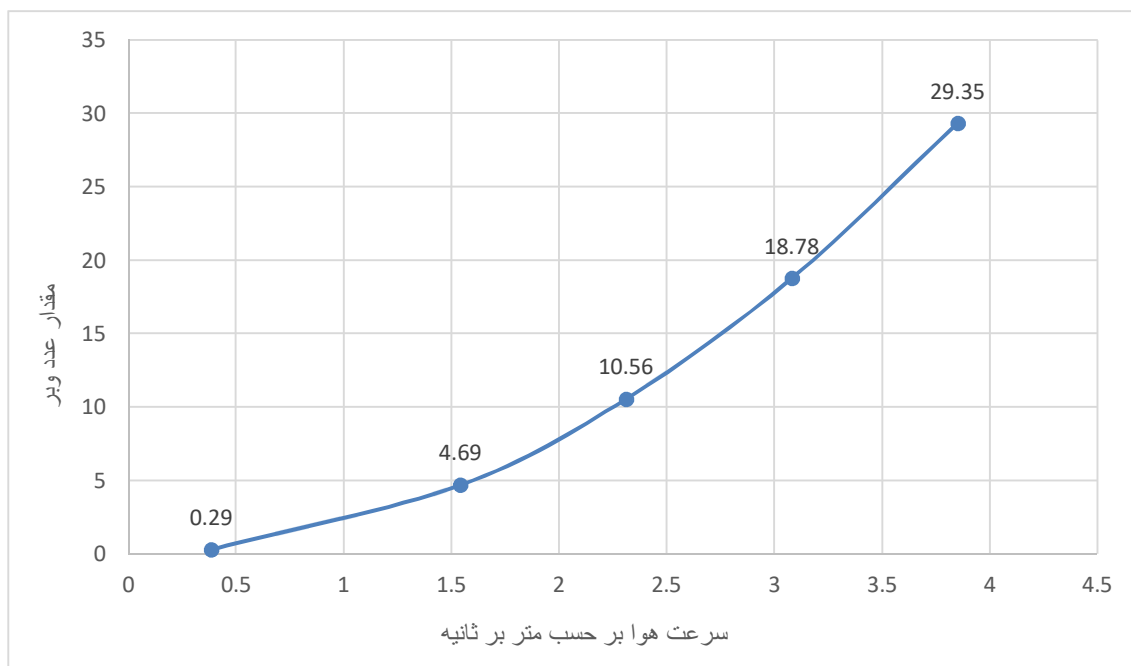


نمودار (۸-۵) عدد وبر بر حسب سرعت هوا در ناحیه سرعت قطرات

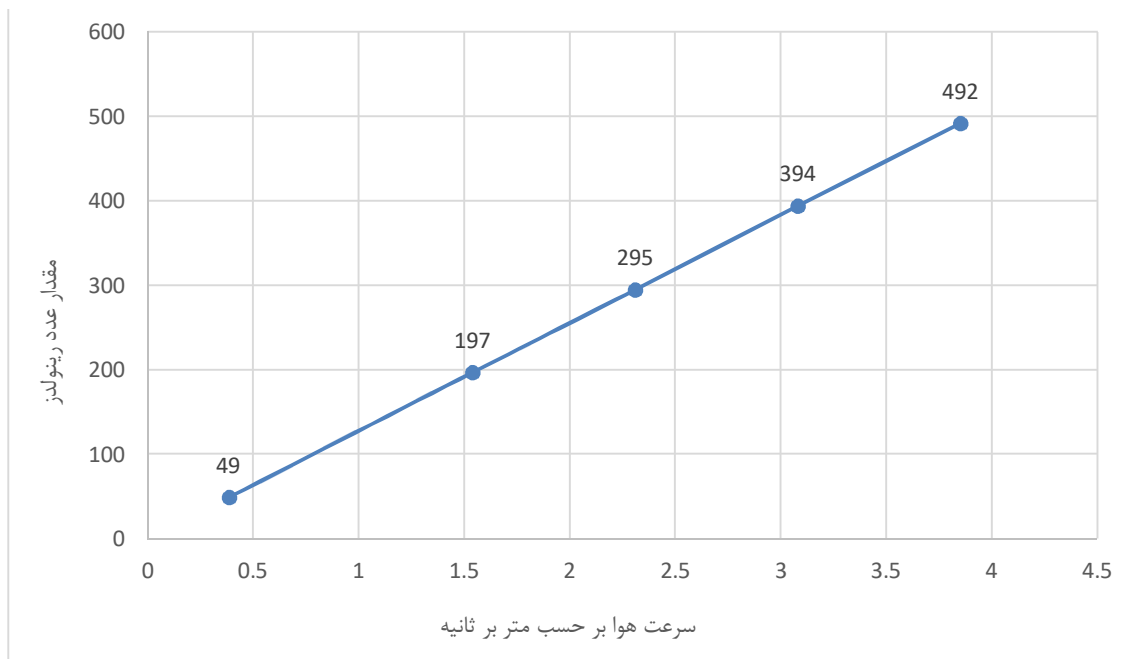


نمودار (۵-۹) عدد رینولدز بر حسب سرعت هوا در ناحیه سرعت قطرات

نمودار (۵-۱۰) عدد و بر و نمودار (۵-۱۱) عدد رینولدز را در ناحیه سرعت هوا و در سرعت های مختلف نشان میدهد که با افزایش سرعت هوا مقادیر آن افزایش می یابد



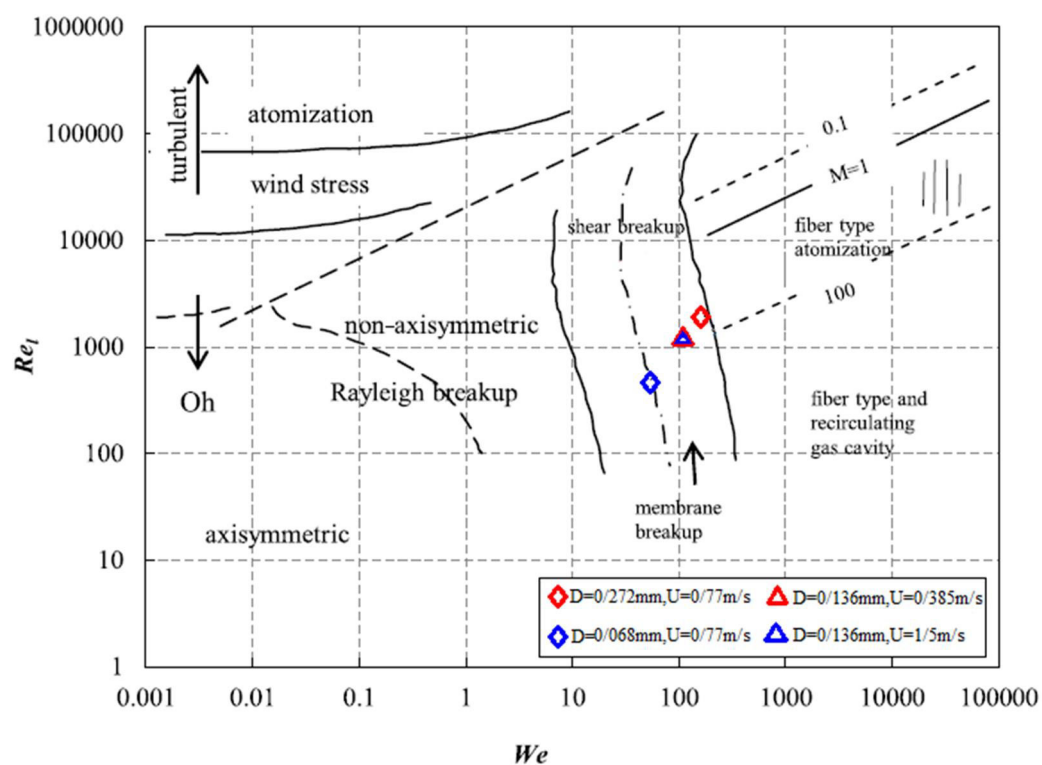
نمودار (۵-۱۰) عدد و بر بر حسب سرعت هوا در ناحیه سرعت هوا



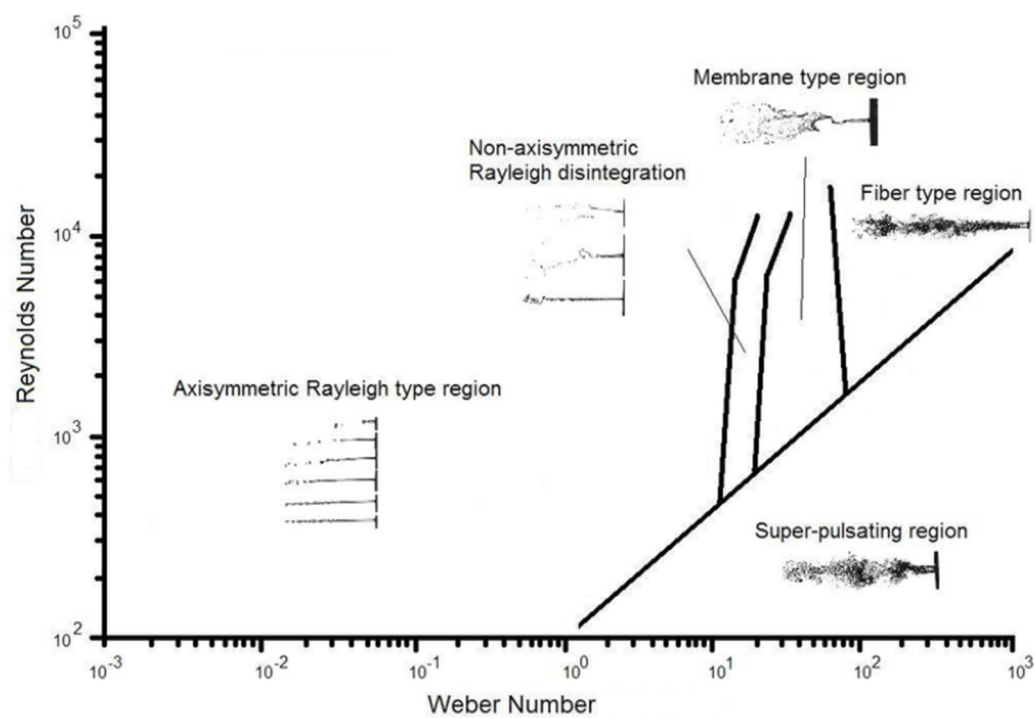
نمودار (۵-۱۱) عدد رینولدز بر حسب سرعت هوا در ناحیه سرعت هوا

نمودار (۵-۱۲) که توسط هافینگر^۱ در سال ۱۹۹۸ [۴۰] ارائه شد نشانگر نوع شکست تزریق بر حسب عدد رینولدز و وبر می باشد. مقادیر بدست آمده بر حسب قطر قطرات و سرعت هوا روی نمودار نشان داده شده که تمامی حالت ها شکست غشایی را برای تزریق سیال مایع نشان میدهند، همچنین برای درک بهتر اینکه شکل شکست تزریق بر حسب این نمودار به چه صورت می باشد شکل (۵-۲۲) ارائه شده که نواحی مختلف آن بیانگر نوع شکست های مختلف است.

^۱ Hopfinger

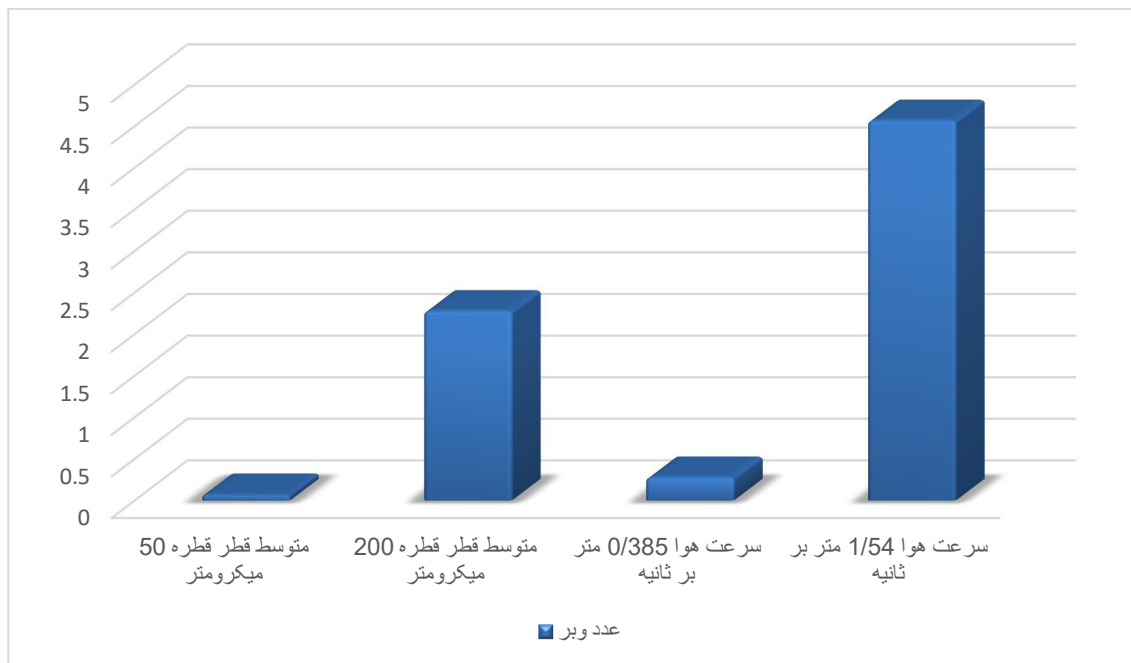


نمودار (۵-۱۲) رینولدز بر و بر در ناحیه سرعت قطرات



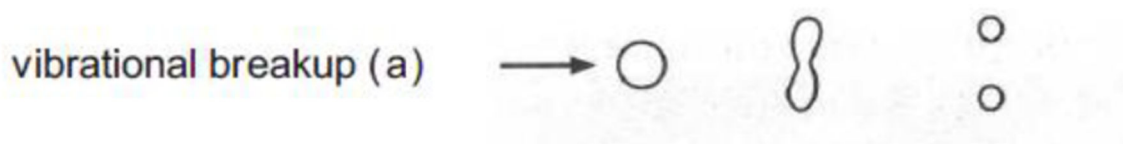
شکل (۵-۲۲) نوع شکست تزریق بر حسب نمودار رینولدز بر و بر

در نمودار (۵) مقادیر نتایج حاصل از شبیه سازی ها در فاصله بیش از ۱۰ سانتیمتر از نازل نشان داده شده که بر حسب مقدار عدد وبر می توان نوع شکست قطرات که به صورت گسسته در هوا جریان دارد نشان داد.



نمودار (۵-۱۳) عدد وبر در ناحیه سرعت هوا در حالت های مختلف

با توجه به نمودار (۵-۱۳) و مقادیر عدد وبر به دست آمده برای حالت های مختلف مشخص گردید که نوع شکست قطرات در ناحیه سرعت هوا در هر چهار حالت از نوع شکست لرزشی می باشد که در شکل (۵-۲۳) نشان داده شده است.



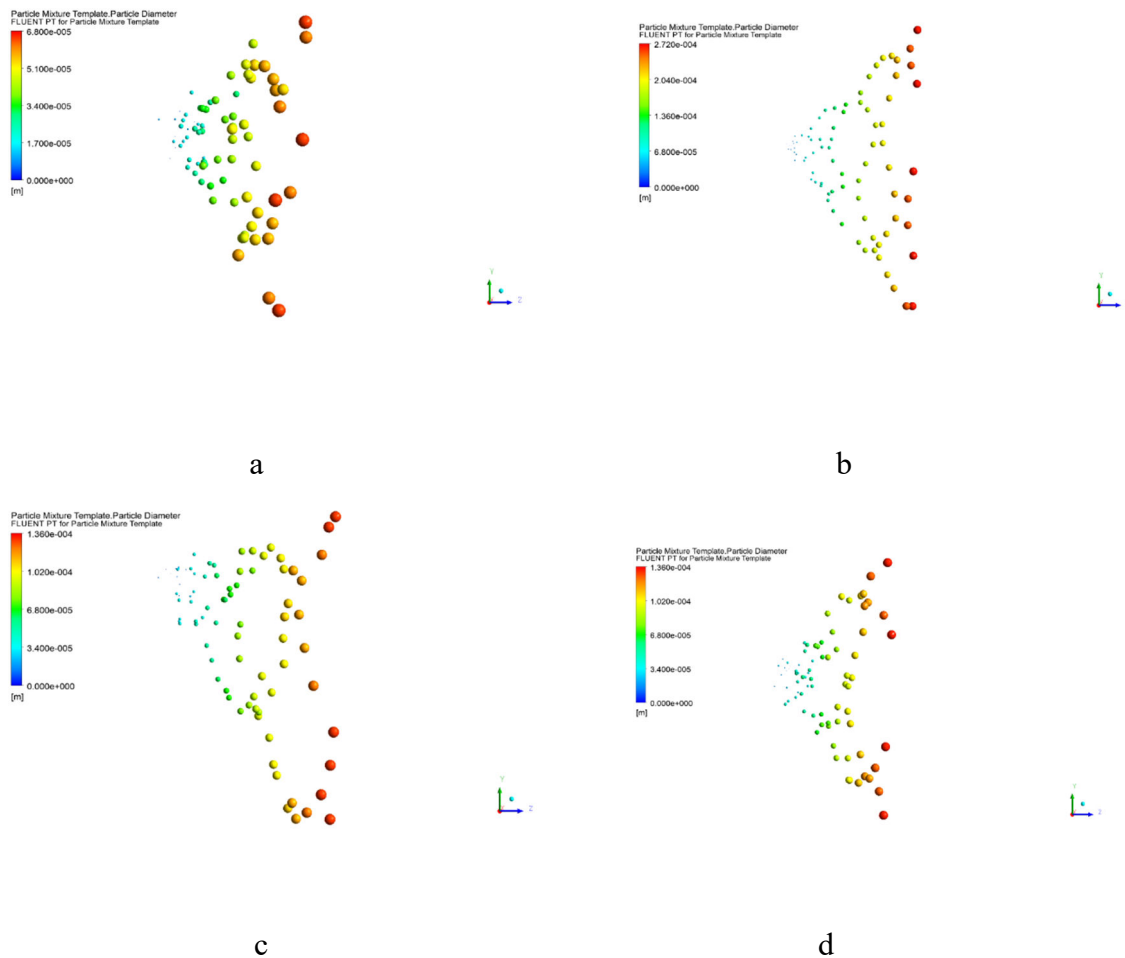
شکل (۵-۲۳) شکست لرزشی

۵-۸- توزیع قطرات در شکست تزریق سیال مایع

در قسمت قبل به نوع شکست تزریق بر حسب عدد وبر و رینولدز اشاره شد که هر چهار حالت بررسی شده نوع شکست غشایی را نشان می‌دهند. در این بخش توزیع قطرات در شکست تزریق را برای هر چهار حالت بررسی و با داده های تجربی مقایسه می‌کنیم. شکل (۵-۲۳) نشانگر شکست غشایی در محدوده تزریق سیال مایع می‌باشد و شکل (۵-۲۴) نتایج به دست آمده از توزیع قطرات در این ناحیه می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از توزیع قطرات شباهت زیادی به داده های تجربی دارد که از این رو می‌تواند اثباتی بر گفته های قبل باشد.



شکل (۵-۲۴) شکست تزریق از نوع غشایی

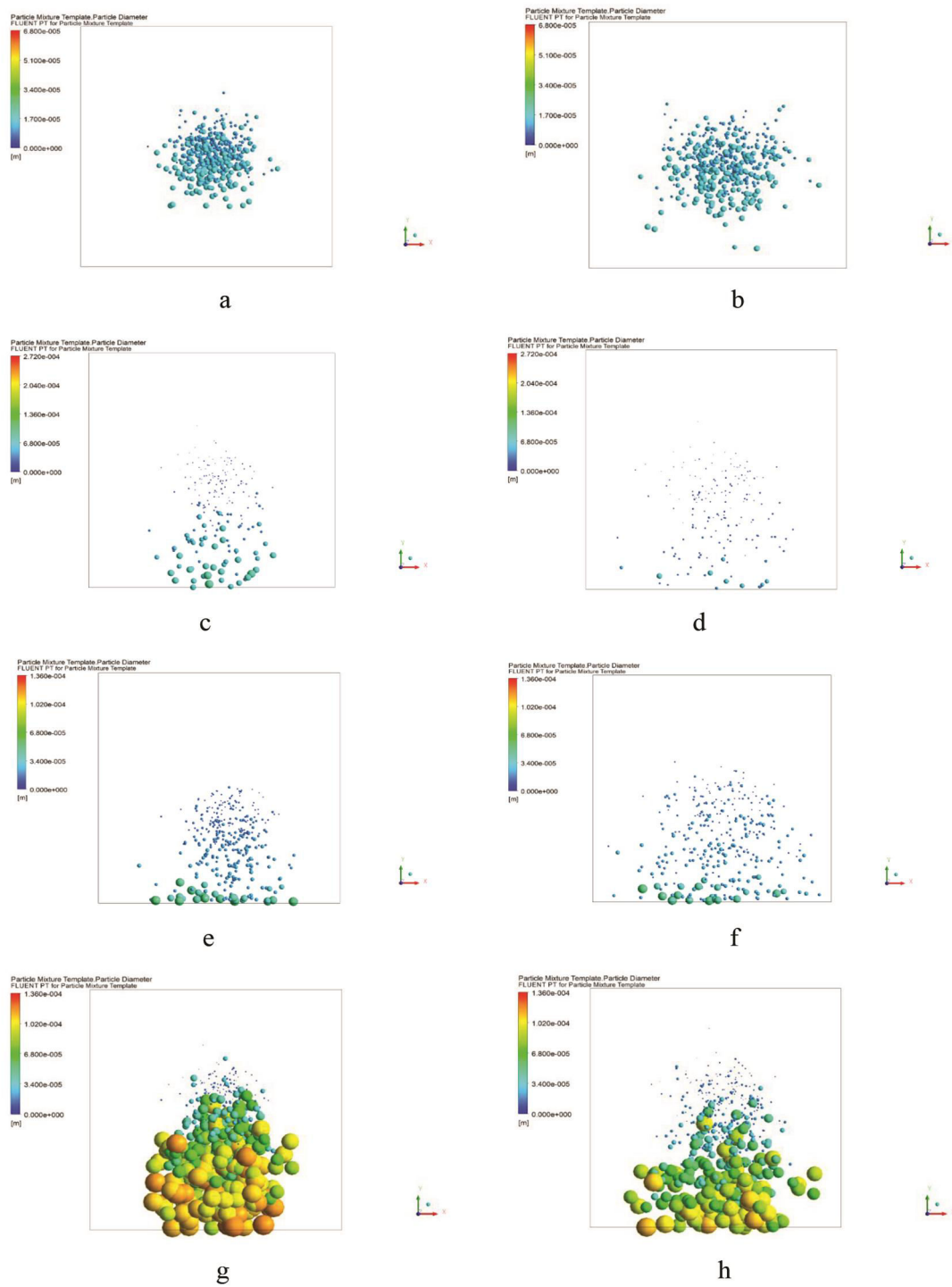


شکل (۵-۲۵) توزیع قطرات در شکست تزریق برای (a) متوسط قطر ۵۰ میکرومتر (b) متوسط قطر ۲۰۰ میکرومتر (c) سرعت هوای ۰,۳۸۵ متر بر ثانیه (d) سرعت هوای ۱,۵۴ متر بر ثانیه

۵-۹- توزیع قطرات در طول جریان

توزیع قطرات یکی از عوامل مهم در میزان انتقال حرارت، سرعت و در نتیجه مقدار تبخیر می باشد هر چه قطرات فاصله بیشتری از یکدیگر داشته باشند هوای محیط تاثیر بیشتری بر قطرات میگذارد در این بخش برای تعیین توزیع مناسب قطرات در محیط، دو فاصله ۲ متری و ۳ متری از نازل در نظر گرفته شد و توزیع قطرات در هر دو فاصله نشان داده شد. نتایج نشانگر تمایل قطرات به پخش شدگی در طول مسیر می باشد اما در حالت سرعت هوای ۱,۵۴ متر بر ثانیه به علت سرعت هوای زیاد قطرات تمایلی به پخش شدگی ندارند و هر قطره در طول مسیر خود ادامه میابد و تحت تاثیر نیروی گرانش

به سمت دیواره پایینی میل میکند اما در سه حالت دیگر قطرات پخش شدگی مناسبی دارند و می توان توزیع قطرات آنها را در طول مسیر مناسب دانست.



شکل (۵-۲۶) توزیع قطرات در فاصله ۲ متری از نازل (سمت چپ) و ۳ متری از نازل (سمت راست) به ترتیب برای قطر ۶۸ میکرومتر، ۲۷۲ میکرومتر، سرعت هوای ۰,۳۸۵ متر بر ثانیه و ۱,۵۴ متر بر ثانیه

با نگاهی به توزیع قطرات میتوان دریافت که در حالت سوم یعنی سرعت هوای ۰,۳۸۵ متر بر ثانیه میزان تراکم در مرکز جریان قطرات در فاصله ۳متری نسبت به فاصله ۲متری از نازل به اندازه قابل توجهی کاهش داشته که از این رو می توان این حالت را نسبت به دیگر حالت ها دارای توزیع مناسب تر دانست.

۵-۱۰- نتیجه گیری

در بررسی کانتورهای سرعت و چگالی مشخص است که در نقاطی که سرعت بالاتر است، چگالی نیز زیاد است، دلیل این امر سرعت نسبی بالاتر ذرات مایع نسبت به هوا مطابق شرایط مرزی اعمال شده می باشد.

مقادیر وبر و رینولدز در هنگام تغییر سیال مایع پیوسته به گسسته به دلیل بالا بودن سرعت سیال، زیاد می باشد و در ۱۰ سانتیمتر از نازل این مقادیر به شدت کاهش می یابند.

مقادیر رینولدز بعد از ۱۰ سانتیمتر برای حالت های تغییر قطر قطرات و تغییر سرعت هوا همواره یک مقدار برابر است.

در حالت هایی که سرعت هوا کمتر از سرعت قطره باشد تغییرات سرعت هوا تاثیری بر نوع شکست تزریق ندارد.

افزایش سرعت هوا باعث کاهش و کاهش سرعت هوا باعث افزایش توزیع مناسب قطرات در طول مسیر می باشد.

با نگاهی به مسیر جریان قطرات می توان دریافت که تقریباً تمام دبی جرمی آب در حال جریان در هوا از نیمه پایینی تونل عبور میکند.

استفاده از آب شور برای خنک کاری اسپری، مسئله خوردگی سطوح فلزی را به دلیل وجود یون های Cl محلول در پاشش آب و رسوب نمک مطرح میکند. استراتژی پیشنهادی برای این کار،

ایجاد فاصله ایمن بین نازل ها و مبدل های حرارتی است به طوری که تمام قطرات نزدیک به سطوح فلزی کاملاً خشک باشد.

۵-۱۱- پیشنهادات

- با استفاده از کدنویسی دو بعدی یا سه بعدی نتایج تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گیرد.
- نرخ تبخیر در دماهای مختلف بررسی شود.
- از سیالات دیگر برای بررسی رفتار تبخیر استفاده شود.

منابع و مأخذ

- [1] Spalding D.B., (1953), The combustion of liquid fuels In: Proceedings of the Fourth Symposium(International) on Combustion, Combustion Institute, Baltimore, MD, pp. 847-864.
- [2] Godsave G.A.E., (1953), Studies of the combustion of drops in a fuel spray: the burning of single drops of fuel. In: Proceedings of the Fourth Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, Baltimore, MD, pp. 818-830.
- [3] Crowe C.T., Sharma M.P. and Stock D.E., (1977). The particle source in cell (PSI-cell) model for gas droplet flows, J. Fluids Eng., 6, pp. 325-332
- [4] Bellan J. and Summerfield M., (1978), Theoretical examination of assumptions commonly used for the gas phase surrounding a burning droplet, Comb. Flame, 33, pp. 107-122.
- [5] Jackson R. and Davidson B.J., (1983), An equation set for non-equilibrium two phase flow, and an analysis of some aspects of choking, acoustic propagation, and losses in low pressure wet steam, Int. J. Multiphase Flow, 9, (5), pp. 491-510.
- [6] Aggarawal S.K., Tong A Y. and Sirignano W.A, (1984), A comparison of vaporization models in spray calculations, AIAAJ., 22, (10), pp. 1448-1457.
- [7] Sirignano W.A., (1993), Fluid dynamics of sprays, J. Fluids Eng., 115, pp. 345-378.
- [8] Aggarwal S.K. and Peng F., (1995), A review of droplet dynamics and vaporization modeling for engineering calculations, J. Eng. Gas Turbines Power, 117, pp. 453-461. 191
- [9] Miller R S., Harstad K and Bellan J., (1998). Evaluation of equilibrium and non-equilibrium evaporation models for many-droplet gas-liquid flow simulations, International Journal of Multiphase Flow, 24, pp. 1025-1055.
- [10] Dushin V.R., Kulchitskiya A.V., Nerchenkoa V.A., Nikitina V.F., Osadchaya E.S., Phylippova Yu.G. and Smirnov N.N., (2008), Mathematical simulation for non-equilibrium droplet evaporation, Acta Astronautica, 63, pp. 1360-1371.
- [11] Duan, R. Q., Koshizuka, S., and Oka, Y., "Numerical and Theoretical Investigation of Effect of Density Ratio on the Critical Weber Number of Droplet Breakup," Journal of Nuclear Science and Technology, 40, No. 7, pp. 501-508, 2003.
- [12] O'Rourke, P. J., and Amsden, A. A., "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE
- [13] Gelfand, B. E., "Droplet Breakup Phenomena in Flows with Velocity Lag," Prog. Energy Combust. Sci. 22, pp. 201-212, 1996.
- [14] Liu. H., "An Investigation of Thermal Modulation Effect on Liquid Sheet Breakup," PhD Thesis, University of Alabama, 2008.
- [15] O'Rourke PJ, 1981, collective drop effects on vaporizing liquid sprays technical Report LA-9069-T, Los Alamos National laboratory
- [16] Gavaises M. Modeling of diesel fuel injection processes. PhD thesis, Imperial College of Science and Technology and Medicine, University of London, London, UK, 1997.
- [17] Williams A, Combustion of Droplets of liquid Fuels a Review Combustion and Flame, vol. 21, pp. 1-31, 1983
- [18] Gosman, AD, Johns J.R, and Watkins a. p, Computer Analysis of Fuel-Air Mixing in Direct -- injection Engines, SAE Paper No.800091, (1980).
- [19] Hay and Jones PL, Comparison of the various correlations, SAE technical paper series 720776.
- [20] Elkotob MM. , Salem H and Awad ME, Investigation of multifuel sprays in swirl chamber of diesel engines, ASME, 87-FE-6.

[21] Varde KS, Popa DM , spary angle and atomization in diesel sprays, SAE841005.

[۲۲] وحید ابراهیمیان، "مدل سازی دو بعدی پاشش آب در یخار مافوق گرم خروجی از بویلر نیروگاه بخار"، پایان نامه کارشناسی ارشد گروه مکانیک دانشکده فنی دانشگاه مازندران، ۱۳۸۵.

[23] Reitz, R.D. and Diwakar, J. "Effect of Drop Break-up on Fuel Sprays", SAE 860469. 1986

[24] Reitz, R.D. "Computer Modeling of Sprays", Spray technology short course. University of Wisconsin

[25] Thring MW, Newby MP, 1953, Combustion Length of Enclosed Turbulent Jet Flames, Fourth Symposium (international) on Combustion, The Combustion institute, Pittsburgh, pp.789-796

[26] Newman JA, Brzustowski TA, 1971, AIAA J., Vol.9, pp. 1595-1602.

[27] Faeth GM, 1983, Evaporation and combustion of sprays, progress in Energy and combustion Science, pergamon press, New York, Vol. 9, pp. 1-76.

[28] Gosman, A.D. and A.P. Watkins. A Computer Prediction Method for Turbulent Flow and Heat Transfer in Piston/Cylinder Assemblies. in Symposium on Turbulent Shear Flows. 1977. Pennsylvania State University.

[29] Yakhot, V. and S.A. Orszag, Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. Journal of Scientific Computing, 1986. 1(1): p. 3-51

[30] Han, Z. and R.D. Reitz, Turbulence Modeling of Internal Combustion Engines Using RNG κ - ϵ Models. Combustion Science and Technology, 1995. 106(4-6): p. 267-295

[31] Liu, A.B., et al., Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays 1993: Society of Automotive Engineers

[32] Nijdam JJ, Guo B, Fletcher DF, Langrish TA. Lagrangian and Eulerian models for simulating turbulent dispersion and coalescence of droplets within a spray. Appl Math Model 2006;30:1196-1211.

[33] Morsi S, Alexander A. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. J Fluid Mech 1972;55:193-208.

[34] C. Davies, Evaporation of airborne droplets, Fund. Aerosol Sci. (1978) 135–164.

[35] Zhao, F., Bo, H., Zhou, Y., et al. A high efficiency and precision interpolation method for searching fluid field information around droplets in sparse two-phase flow. In: Xi'an, China: 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH 17), 2017, pp. 1–14.

[36] Fulong Zhao, Xiao Yan , Hanliang Bo , Tao Meng , Chen Zeng , Sichao Tan . Application of droplet motion and phase change model in containment spray system. Annals of Nuclear Energy 131 (2019) 123–137

[37] Faeth GM, 1983, Evaporation and combustion of sprays, progress in Energy and combustion Science, pergamon press, New York, Vol. 9, pp. 1-76.

[38] Ansys fluent toolbox, Programmer's Guide

[39] M.H. Sadafi, J. Ruiz, M. Lucas, I. Jahn, K. Hooman, Numerical and experimental study on a single cone saline water spray in a wind tunnel

[40] Hopfinger, E. , 1998. Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream. In: Advances in Turbulence VII. Springer, pp. 69–78 .

Abstract

Spraying in diverse and important industrial environments, such as combustion in the combustion chamber of gas turbines or in combustion engines, dryers, cooling with the help of spray evaporation, surface cleaners, ink jet printers, power plants and the like has usage it. Considering the importance of providing and preventing the formation of particles in the form of liquid droplets in the use of important industrial resources and the possibility of creating a secondary flow to achieve the necessary conditions for a more accurate understanding of the behavior of liquid particles under the influence of the fluid field. In this research, we are looking for the effect of the flow pattern of the surrounding environment on the atomized particles in order to determine the effect of the air speed and the initial diameter of the droplets on the amount of evaporation and more uniform production. Four evaporation models have been produced under different conditions. The results show that changes in the initial diameter of the drop have a greater effect on the amount of evaporation, and also that increasing the ambient air speed only in one interval increases evaporation. The type of liquid fluid injection failure is studied according to the Reynolds-Weber diagram and the type of droplet failure according to the Weber number, as well as the distribution of droplets along the flow path.

Keywords: spray, evaporation, droplet, modeling, discrete phase, continuous phase



Shahrood university of technology

Engineering Faculty of Mechanical and Mechatronics

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Modeling of moisture distribution in water spray under the influence of air flow

By :

Behzad azizi

Supervisor

Dr. Ali sarreshtehdari

Advisor

Dr. Mohsen nazari

February 2020