



**به نام خداوند بخشنده و مهربان**



دانشگاه محقق اردبیلی  
دانشکده فنی و مهندسی

گروه مکانیک

# بررسی انتقال حرارت جابه جایی در برخورد جت هوای آرام و دوبعدی به سطح گوه ای شکل با زاویه های متفاوت

استاد راهنما:

دکتر مصطفی رحیمی

توسط:

محمد ایرانی

دانشگاه محقق اردبیلی

اردبیل - ایران

بهمن - ۱۳۸۸



تقدیم بہ پدرم

و

تقدیم بہ مادرم

## سپاسگزاری

"تنها آن کس که بزرگترین جای را به خود اختصاص نمی‌دهد می‌تواند آزادانه با دیگران بخندد، با دیگران بگریزد." خداوند بی‌نیاز را شاکرم که در سایه‌ی لطفش این مقطع از تحصیل را پشت سر گذاشتم. و قدردانم از پدرم و مادرم که با مراقبت‌های پاکشان و دلسوزی‌های صمیمیشان روح من را در باغچه عاطفه آبیاری کردند. و امید دیدن لبخند ساده‌شان، بهانه‌ی بزرگیست برای تحمل زندگی. از جناب آقای دکتر مصطفی رحیمی که در تمام مراحل اجرای پایان‌نامه من را با راهنمایی‌های خود یاری نمودند سپاسگزاری می‌کنم. و از دوستان و هم‌اتاقی‌های عزیزم آقایان مجتبی کریم‌پور، عباس محمدیان، امیر صابرنعیمی و محمد رضا روزگار که در مراحل مختلف اجرای پایان‌نامه من را مورد مساعدت خود قرار دادند، تشکر می‌کنم. همچنین از آقای مهندس بهزاد شهبازی مسئول محترم خوابگاه چهار و آقای سلیمی مسئول محترم آزمایشگاه‌ها و کارگاه‌های دانشکده‌ی فنی مهندسی به خاطر کمک‌های بی‌دریغشان سپاسگزاری می‌کنم.

محمد ایرانی

نام خانوادگی دانشجو: ایرانی	نام: محمد
عنوان پایان نامه: بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی در برخورد جت هوای دو بعدی به سطح گوه‌ای شکل با زاویه‌های متفاوت	
استاد راهنما: دکتر مصطفی رحیمی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی مکانیک تبدیل انرژی
دانشکده: فنی و مهندسی	تاریخ فارغ التحصیلی: ۸۸/۱۰/۳۰
تعداد صفحه: ۸۲	دانشگاه: محقق اردبیلی
کلید واژه‌ها: جت برخوردی، انتقال حرارت جابه‌جایی، سطوح گوه‌ای شکل و عدد ناسلت	
<p><b>چکیده:</b></p> <p>جت‌های برخوردی به طور گسترده در بسیاری از کاربردهای مهندسی به منظور خنک کاری، گرمکاری و خشک کردن صفحات استفاده می‌شود. از جمله کاربردهای مهم جت‌های برخوردی، می‌توان خنک‌کاری پره‌های توربین گاز و قطعات الکترونیکی را نام برد. در این تحقیق یک کار آزمایشگاهی به منظور بررسی نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی از یک سطح گوه‌ای شکل به جت هوای دوبعدی که روی رأس گوه پاشیده می‌شود انجام گرفته است. عدد رینولدز جت و فاصله‌ی نازل تا سطح و زاویه رأس گوه به عنوان پارامترهای اصلی این مطالعه به شمار می‌آیند. عدد رینولدز جت در محدوده‌ی ۵،۰۰۰ تا ۲۰،۰۰۰ و فاصله‌ی بی‌بعد نازل تا رأس گوه <math>H/W = ۱۰, ۴</math> در نظر گرفته شد. زاویه‌ی رأس گوه در محدوده‌ی <math>۳۰^\circ</math> تا <math>۱۸۰^\circ</math> تغییر می‌کرد، که در مورد زاویه‌ی رأس <math>۱۸۰^\circ</math> این آزمایش با حالت معروف برخورد جت با صفحه‌ی تخت منطبق می‌شود. عدد ناسلت متوسط و محلی در سطح برخورد برای تمام حالات بیان شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، با کاهش زاویه‌ی رأس گوه، عدد ناسلت محلی در منطقه‌ی سکون افزایش، ولی در نواحی دیگر سطح برخورد کاهش می‌یابد. عدد ناسلت متوسط در زاویه‌ی رأس <math>۱۸۰^\circ</math> برای تمام حالات آزمایش (تمامی اعداد رینولدز و هر دو فاصله‌ی نازل تا رأس گوه) ماکزیمم به دست آمد.</p>	

فهرست مطالب ..... صفحه

فصل اول: مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته ..... ۱

۱-۱- معرفی و کاربرد جت برخوردی ..... ۲

۲-۱- مشخصات جریان در جت برخوردی ..... ۳

۳-۱- تقسیم بندی جت های برخوردی ..... ۶

۴-۱- مسئله انتقال حرارت جابه جایی ..... ۱۰

۴-۱-۱- یادآوری در مورد لایه های مرزی جابه جایی ..... ۱۲

۴-۱-۱-۱- لایه مرزی سرعت ..... ۱۲

۴-۱-۲- لایه مرزی گرمایی ..... ۱۳

۴-۱-۳- مفهوم لایه های مرزی ..... ۱۴

۴-۱-۲- جریان آرام (لایه ای) و جریان متلاطم ..... ۱۴

۵-۱- خصوصیات انتقال حرارت در جت های برخوردی ..... ۱۶

۶-۱- مروری بر کارهای انجام شده در مورد جت های برخوردی ..... ۱۹

۶-۱-۱- بررسی جت های عمودی ..... ۲۰

۶-۱-۲- بررسی جت های مایل ..... ۲۲

۶-۱-۳- تأثیر مشخصات سطح برخورد ..... ۲۵

۷-۱- مروری بر مطالعات گذشته در مورد جریان موازی حول سطح گوه ای شکل ..... ۲۶

۸-۱- تعریف و ضرورت تحقیق حاضر ..... ۲۷

فصل دوم: وسیله آزمایش و نحوه مطالعه تجربی ..... ۲۹

مقدمه ..... ۳۰

۱-۲- تحلیل ابعادی مسئله ..... ۳۰

۲-۲- توضیح لوازم آزمایش ..... ۳۳

۲-۲-۱- نازل ..... ۳۳

۲-۲-۲- سطوح گوه ای شکل ..... ۳۵

۲-۲-۳- تولید شار حرارتی ثابت ..... ۳۶



- ۳۸-۳-۲- وسایل اندازه‌گیری ..... ۳۸
- ۳۸-۳-۲-۱- اندازه‌گیری سرعت ..... ۳۸
- ۳۹-۳-۲- اندازه‌گیری دما ..... ۳۹
- ۴۰-۴-۲- نحوه‌ی انجام آزمایش ..... ۴۰
- ۴۰-۵-۲- محاسبه‌ی سهم انواع انتقال حرارت در فویل ..... ۴۰
- ۴۳-۶-۲- نحوه‌ی محاسبه‌ی عدد ناسلت ..... ۴۳
- ۴۵-۷-۲- آنالیز عدم قطعیت ..... ۴۵

## فصل سوم: نتایج ..... ۵۱

- مقدمه ..... ۵۲
- ۳-۱- تأثیر عدد رینولدز و فاصله‌ی نازل تا رأس گوه ..... ۵۲
- ۳-۲- تأثیر زاویه‌ی رأس گوه ..... ۵۷
- ۳-۳- ارائه‌ی روابط پیشنهادی ..... ۶۸
- ۳-۴- مقایسه‌ی جریان جت و جریان موازی روی سطوح گوه‌ای شکل ..... ۶۹
- ۳-۵- مقایسه‌ی نتایج با نتایج تحقیقات گذشته ..... ۷۴

## فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ۷۸

- ۴-۱- نتیجه‌های تحقیق ..... ۷۹
- ۴-۲- پیشنهادات برای کارهای آتی ..... ۸۰

## منابع ..... ۸۱

فهرست شکل ها	صفحه
شکل (۱-۱): ناحیه‌های جریان در یک جت برخوردی	۴
شکل (۲-۱): تشکیل لایه مرزی در سطح برخورد	۴
شکل (۳-۱): نمایی از الف) یک جت محدود. ب) یک جت آزاد	۷
شکل (۴-۱): الف) جت سطح آزاد ب) جت غوطه‌ور و نمایش لایه برشی و تولید گردابه در آن	۸
شکل (۵-۱): جت برخوردی الف) متقارن محوری ب) صفحه‌ای	۹
شکل (۶-۱): انواع نازل از لحاظ طراحی الف) نازل زنگوله ای ب) نازل بلند ج) نازل لبه تیز	۱۰
شکل (۷-۱): انتقال حرارت جابجایی محلی سطح با شکل اختیاری	۱۱
شکل (۸-۱): تشکیل لایه مرزی سرعت و لایه مرزی گرمایی برای یک سطح اختیاری	۱۴
شکل (۹-۱): تشکیل لایه مرزی سرعت روی صفحه	۱۵
شکل (۱۰-۱): تغییر ضخامت لایه مرزی سرعت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی برای جریان روی صفحه	۱۶
شکل (۱۱-۱): تغییرات عدد ناسلت برحسب فاصله از نقطه‌ی برخورد الف) فاصله‌ی بی بعد بیشتر از مقدار آستانه ب) فاصله‌ی بی بعد کمتر از مقدار آستانه	۱۷
شکل (۱۲-۱): شماتیکی از نحوه‌ی قرار گرفتن گوه و نازل مقابل هم	۲۷
شکل (۱-۲): پارامترهای هندسی مسئله‌ی حاضر	۳۱
شکل (۲-۲): نازل ایجاد جت هوا که روی تونل باد نحوه‌ی قرار گرفتن آن در مقابل سطح گوه‌ای	۳۴
شکل (۳-۲): نمای شماتیکی از نازل استفاده شده در آزمایشات	۳۴
شکل (۳-۲): گوه‌های چوبی استفاده شده در آزمایشات	۳۵
شکل (۴-۲): فویل‌های چسبانده شده روی سطوح گوه‌ای شکل	۳۶
شکل (۷-۲): دستگاه پیتوتیوب برای اندازه‌گیری سرعت نازل	۳۸

- شکل (۲-۱۰): ترمومتر لیزری و نحوه‌ی اندازه‌گیری دما ..... ۳۹
- شکل (۲-۱۱): نمای سطح گوه‌ای از روبرو و نقاط علامت زده شده برای اندازه‌گیری دما ..... ۳۹
- شکل (۲-۱۲): شماتیکی از حجم کنترل در نظر گرفته شده ..... ۴۲
- شکل (۳-۱): توزیع عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف روی صفحه‌ی قائم ..... ۵۳
- شکل (۳-۲): توزیع عدد ناسلت، روی سطح گوه با زاویه‌ی رأس  $150^\circ$  ..... ۵۳
- شکل (۳-۳): توزیع عدد ناسلت، روی سطح گوه با زاویه‌ی رأس  $120^\circ$  ..... ۵۴
- شکل (۳-۴): توزیع عدد ناسلت، روی سطح گوه با زاویه‌ی رأس  $90^\circ$  ..... ۵۴
- شکل (۳-۵): توزیع عدد ناسلت، روی سطح گوه با زاویه‌ی رأس  $60^\circ$  ..... ۵۵
- شکل (۳-۶): توزیع عدد ناسلت برای زاویه‌ی رأس  $30^\circ$  ..... ۵۵
- شکل (۳-۷): مقایسه‌ی بین توزیع عدد ناسلت در دو فاصله‌ی بی‌بعد ۴ و ۱۰ برای دو حالت ..... ۵۶
- شکل (۳-۸): توزیع عدد ناسلت برای زوایای رأس مختلف در حالت  $Re=5300$  و  $H/W=4$  ..... ۵۹
- شکل (۳-۹): توزیع عدد ناسلت برای زوایای رأس مختلف در حالت  $Re=5300$  و  $H/W=10$  ..... ۵۹
- شکل (۳-۱۰): توزیع عدد ناسلت برای زوایای رأس مختلف در حالت  $Re=10500$  و  $H/W=4$  .. ۶۰
- شکل (۳-۱۱): توزیع عدد ناسلت برای زوایای رأس مختلف در حالت  $Re=10500$  و  $H/W=10$  ..... ۶۰
- شکل (۳-۱۲): توزیع عدد ناسلت برای زوایای رأس مختلف در حالت  $Re=15900$  و  $H/W=4$  .. ۶۱
- شکل (۳-۱۳): توزیع عدد ناسلت برای زوایای رأس مختلف در حالت  $Re=15900$  و  $H/W=10$  ..... ۶۱
- شکل (۳-۱۴): توزیع عدد ناسلت برای زوایای رأس مختلف در حالت  $Re=20900$  و  $H/W=4$  ..... ۶۲
- شکل (۳-۱۵): توزیع عدد ناسلت برای زوایای رأس مختلف در حالت  $Re=20900$  و  $H/W=10$  ..... ۶۲
- شکل (۳-۱۶): تغییرات عدد ناسلت در نقطه‌ی برخورد نسبت به تغییر عدد رینولدز در فاصله‌ی بی - بعد ۴ ..... ۶۳
- شکل (۳-۱۷): تغییرات عدد ناسلت در نقطه‌ی برخورد نسبت به تغییر عدد رینولدز در فاصله بی‌بعد ۱۰ ..... ۶۴

- شکل (۳-۱۸): تغییرات عدد ناسلت متوسط برای فاصله‌ی  $y/W=11/61$  نسبت به تغییر عدد رینولدز در فاصله‌ی بی‌بعد ۴ ..... ۶۵
- شکل (۳-۱۹): تغییرات عدد ناسلت متوسط برای فاصله‌ی  $y/W=11/61$  نسبت به تغییر عدد رینولدز در فاصله‌ی بی‌بعد ۱۰ ..... ۶۵
- شکل (۳-۲۰): مقایسه‌ی عدد ناسلت در راس گوه ..... ۶۶
- شکل (۳-۲۱): مقایسه عدد ناسلت متوسط برای طول ۱۸ cm از سطح ..... ۶۷
- شکل (۳-۲۲): مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از روابط (۳-۱) و (۳-۲) ..... ۶۸
- شکل (۳-۲۳): مقایسه‌ی جریان جت و جریان موازی روی سطوح گوه‌ای ..... ۷۳
- شکل (۳-۲۴): مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج کارهای گذشته برای عدد ناسلت نقطه‌ی برخورد در حالت برخورد جریان جت به صورت عمودی با صفحه‌ی تخت ..... ۷۵
- شکل (۳-۲۵): مقایسه‌ی نتایج کار حاضر و کار ژوو و لی [۳۵] در حالت فاصله‌ی بی‌بعد برابر ۱۰ و رینولدز ۱۶۰۰۰ ..... ۷۶
- شکل (۳-۲۶): مقایسه‌ی نتایج کار حاضر و کار ژوو و لی [۳۵] در حالت فاصله‌ی بی‌بعد برابر ۴ و رینولدز ۱۶۰۰۰ ..... ۷۶

## فهرست علائم و نمادها

واحد	توضیحات	نماد
$m^2$	مساحت سطح	$A$
$\frac{kJ}{kg K}$	ظرفیت گرمایی ویژه	$c_p$
$m$	عرض نازل شکاف گونه	$D$
$m$	فاصله نازل تا رأس گوه در آزمایشات	$H$
$\frac{W}{m^2 K}$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	$h$
$\frac{W}{m^2 K}$	متوسط ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	$\bar{h}$
$A$	جریان الکتریکی	$I$
$m$	طول فویل آلومنیومی	$l$
-	پارامتر تعریف شده در راه حل تشابه با توجه به زاویه‌ی رأس گوه	$m$
-	عدد ناسلت	$Nu$
-	عدد ناسلت در نقطه‌ی برخورد	$Nu_0$
-	عدد ناسلت با پارامتر طول $x$	$Nu_x$
-	عدد پرانتل	$pr$
$W$	آهنگ کل انتقال حرارت	$q$
$\frac{W}{m^2}$	شار حرارتی محلی بر واحد سطح	$q''$
$W$	انتقال حرارت رسانایی	$q_{cond}$
$W$	انتقال حرارت جابه‌جایی	$q_{conv}$
$W$	شار حرارتی تولیدی	$q_{gen}$
$W$	انتقال حرارت اتلافی از پشت فویل	$q_{loss}$
$W$	انتقال حرارت تشعشعی	$q_{rad}$
$\Omega$	مقاومت الکتریکی فویل	$R$
-	عدد رینولدز	$Re$
-	عدد رینولدز بر اساس پارامتر طول $x$	$Re_x$
$K, C$	درجه حرارت	$T$
$m$	ضخامت فویل آلومنیومی	$t$
$\frac{m}{s}$	سرعت جریان	$u$

-	فاصله هر نقطه روی سطح گوه از رأس گوه	$y/W$
$1/K$	ضریب دمایی مقاومت ویژه برای یک درجه‌ی سلسیوس	$\alpha$
-	پارامتر به دست آمده از حل تشابه برای معادله‌ی انرژی	$\alpha^*$
-	گسیلمندی	$\varepsilon$
$\frac{W}{m^2 K^4}$	ثابت استفان-بولتزمن	$\sigma$
$m$	ضخامت لایه مرزی سرعت	$\delta$
$m$	ضخامت لایه مرزی دمایی	$\delta_t$
-	فاصله‌ی اطمینان برای نمونه‌ی $y$	$\delta y$
-	پارامتر تشابه	$\eta$
-	زاویه‌ی رأس گوه	$\theta$
$\Omega m$	مقاومت ویژه آلومنیوم در دمای $T$	$\rho$
$\Omega m$	مقاومت ویژه آلومنیوم در دمای $T_0$	$\rho_0$
زیر نویس ها		
-	مربوط به سطح	$s$
-	مربوط به المان $i$	$i$
-	مربوط به سیال	$f$
-	مربوط به آلومنیوم	$al$
-	مربوط به چوب	$w$
-	مربوط به خروجی نازل	$\infty$

# فصل اول

مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته

## ۱-۱- معرفی و کاربرد جت برخوردی<sup>۱</sup>

یک جت برخوردی جریان محلی متمرکزی از سیال می‌باشد که از طریق یک شکاف مستطیلی یا دایره‌ای به سمت صفحه هدف پاشیده می‌شود. جریان منظم جت باعث تمرکز بیشتر انتقال حرارت بین دیواره و سیال در یک نقطه (که حوالی نقطه‌ی برخورد است) می‌شود. جت‌های سیالات به صورت مکرر در صنایعی که در آنها انتقال حرارت به صورت متمرکز در یک ناحیه مورد نیاز است مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جت برخوردی به عنوان ابزار موثری در جهت افزایش میزان انتقال حرارت و انتقال جرم در بسیاری از کاربردهای مهندسی و صنعتی به طور چشمگیر مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال در عملیات حرارتی فلزات، خنک کردن موتورهای احتراق داخلی، خشک کاری محصولات نساجی و کاغذ، آب دادن و خنک کاری لیوان، خنک کاری صفحات توربین گاز، خنک کاری قطعات الکترونیکی، یخ زدایی از سیستم‌های هواپیما، انجماد بافت در سرما جهت جراحی و ...، جتهای برخوردی به عنوان یک ابزار اصلی به کار می‌رود.

این تکنیک به خصوص در حالاتی مانند قطعات الکترونیکی که توأم با چشمه‌های حرارتی هستند یک روش موثر در انتقال حرارت است. کنترل دمای اجزای الکترونیک همواره به صورت یک مسئله‌ی جدی برای بالا بردن توان بارگذاری مطرح بوده است. انتظار است که اتلاف توان در آینده‌ای نه چندان دور به  $45W/cm^2$  یا بیشتر برسد و همین باعث شده که صنعت الکترونیک به صورت مستمر در جستجوی راه‌هایی برای رفع این بارگذاری گرمایی باشد. سیستم کنترل دما با



توجه به دو نیاز اصلی، شار حرارتی که باید اتلاف شود و حداکثر دمای مجاز باتوجه به شرایط محیطی، طراحی می‌شود. برای شار حرارتی  $0.5 W/cm^2$  اختلاف دمای مجاز  $60^\circ C$  انتقال حرارت معمولاً به صورت تشعشع و جابجایی طبیعی صورت می‌گیرد. برای انتقال حرارت  $1-2 W/cm^2$  برای اتلاف حرارت به مقدار بیشتری از انتقال حرارت جابجایی نیاز بوده و این مقدار می‌تواند به صورت انتقال حرارت جابجایی اجباری تامین شود. برای شارهای حرارتی بالاتر جت‌های برخوردی می‌توانند به عنوان یک راه حل مورد استفاده قرار بگیرند [۱].

## ۱-۲- مشخصات جریان در جت برخوردی

جت برخوردی به سه ناحیه مشخص تقسیم می‌شود (شکل ۱-۱):

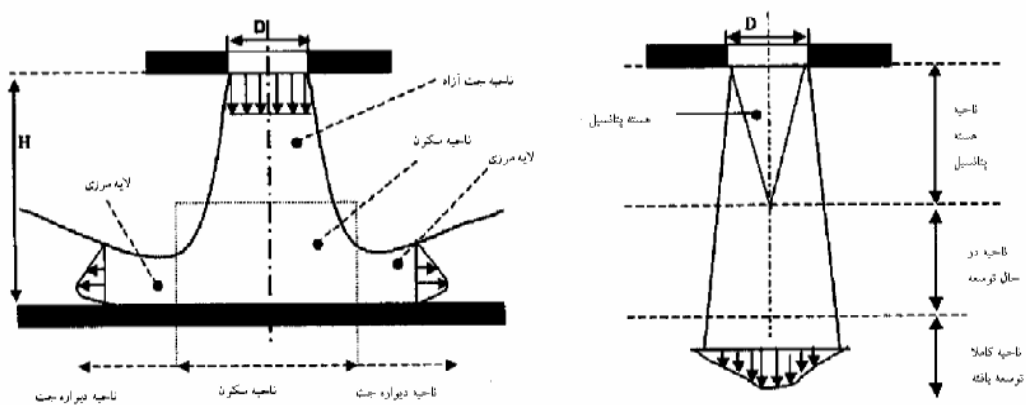
۱- ناحیه جت آزاد<sup>۲</sup>، منطقه‌ی خروجی از نازل می‌باشد که تحت تاثیر سطح برخورد قرار نمی‌گیرد و مستقیماً زیر نازل قرار دارد. سیال صادر شده از نازل با سیال ساکن اطراف ترکیب شده و یک میدان جریان می‌سازد. قسمتی از این ناحیه به هسته‌ی پتانسیل<sup>۳</sup> معروف است، اگر پروفایل سرعت در خروجی نازل به اندازه‌ی کافی تخت باشد اصطلاحاً می‌گوییم یک هسته‌ی پتانسیل در مرکز جت وجود دارد. در این ناحیه هنوز، جریان کنار هسته با اطراف انتقال اندازه حرکت نکرده است، بنابراین در هسته‌ی پتانسیل سرعت متوسط هنوز برابر سرعت خروجی است. جت‌های سیالات معمولاً از نازل گردی به قطر  $D$  یا نازل شکاف دار به عرض  $W$  به محیط ساکنی تخلیه می‌شود معمولاً جت به صورت متلاطم بوده و در خروجی نازل پروفیل سرعت آن یکنواخت است. ولی، با افزایش فاصله از خروجی، تبادل بین جت و محیط باعث می‌شود مرز آزاد جت وسیع و هسته‌ی پتانسیل تنگ شود. پروفیل سرعت در پایین‌تر از هسته‌ی پتانسیل در تمام نقاط مقطع عرضی جت غیر یکنواخت است و سرعت ماکزیمم (سرعت در مرکز) با افزایش فاصله از خروجی نازل کاهش می‌یابد.

---

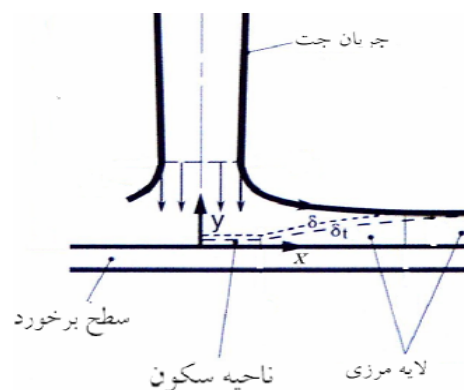
<sup>۲</sup> - Free Jet Region

<sup>۳</sup> - Potential Core

۲- ناحیه‌ی سکون<sup>۴</sup>، منطقه‌ای که در آن جت به طور مستقیم با صفحه برخورد می‌کند. در این منطقه جریان تحت تاثیر سطح هدف قرار می‌گیرد و در جهت عمودی (امتداد  $y$ ) شتاب منفی و در امتداد عرضی ( $x$  یا  $r$ ) شتاب مثبت دارد. در نزدیکی نقطه‌ی برخورد یک ناحیه‌ی سکون وجود دارد که بر اساس گرادیان فشار بالا مشخص می‌شود در این ناحیه جریان در جهت محوری می‌ایستد و به سمت شعاعی چرخش پیدا می‌کند. به همین دلیل فشار هنگام ورود به منطقه‌ی سکون باز افزایش می‌یابد، و جریان حول منطقه‌ی سکون به خاطر گرادیان فشار موافق، آرام است. لایه مرزی در ناحیه‌ی سکون به دلیل گرادیان فشار بالا ایجاد نمی‌شود (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱): ناحیه‌های جریان در یک جت برخوردی



شکل (۲-۱): تشکیل لایه مرزی در سطح برخورد

<sup>4</sup> - Stagnation Region

۳- ناحیه‌ی دیواره‌ی جت<sup>۵</sup>، منطقه‌ی ای است که در آن سیال روی صفحه‌ی هدف جریان می‌یابد. چون جریان دائما سیال با اندازه حرکت صفر را از محیط به همراه می‌برد، شتاب مثبت افقی نمی‌تواند به طور نامحدود ادامه یابد و جریان شتابدار در منطقه‌ی سکون به جریان کند شونده تبدیل می‌شود. لذا، با افزایش  $r$  یا  $x$ ، مولفه‌های سرعت موازی با سطح از مقدار صفر تا مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد و پس از آن به صفر می‌رسد. مشخصه‌ی پروفیل سرعت در دیواره‌ی جت این است که سرعت در سطح برخورد و سرعت در سطح آزاد صفر است. وقتی هوای خنک از نازل به داخل هوای ساکن پاشیده می‌شود، جت با هوای ساکن اطراف یک لایه برشی تشکیل می‌دهد. در این ناحیه سرعت متوسط سیال از سرعت جت به صفر نزول می‌یابد، این ناحیه به دلیل شکل گیری متناوب گردابه‌هایی، نزدیک به دهانه‌ی نازل ناپایدار است. این گردابه‌ها توسط جریان به طرف جلوی صفحه برخورد حمل می‌شود و در این حالت نظم خود را از دست می‌دهند، به علاوه قدری فعل و انفعالات بین آنها صورت می‌گیرد، به طور مثال دو گردابه‌ی مجاور با یکدیگر ادغام می‌شوند. و شدت و قدرت چرخش افزایش می‌یابد، ساختارهای به هم پیوسته منتج از این پروسه‌ها موجب می‌شود که سیال روی دیوار متراکم شود و پروسه‌های انتقال در منطقه‌ی جلوی دیوار، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. خصوصیات گردابه‌ها و آشفتگی حاصل از آنها به شدت به شکل نازل جت بستگی دارد. در جت‌هایی که به صورت سری در کنار هم قرار می‌گیرند انتشار این گردابه‌ها به افزایش انتقال حرارت در فواصل بین جت‌ها کمک می‌کنند. از آنجا که در اینجا تنها اثر یک جت را در نظر می‌گیریم فضای بیشتری برای انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲۴].

جریان صادر شده از جت می‌تواند به دو صورت آرام یا متلاطم باشد که این به عدد رینولدز بستگی دارد. اگر جریان اولیه آرام باشد یک انتقال به جریان آشفته داریم که این انتقال در لایه برشی که ناپایدار بوده شروع می‌شود. اگر رینولدز کم باشد در مرحله‌ی اول گردابه‌های تولیدی در

---

<sup>5</sup> - Wall Jet Region

لایه‌ی برشی نقش دارند. گردابه‌ها به وسیله‌ی جریان به صورت متقارن در دو طرف جت به سمت جریان پایین دست جابجا می‌شود و رشد می‌یابد و در پایان گردابه‌ها از هم متلاشی می‌شوند. در نهایت یک جریان به صورت آشفته توسعه می‌یابد و در خیلی از مواقع فاصله جت از دیوار خیلی کوچک بوده و جت در حالت انتقال با دیواره برخورد می‌کند.

دیواره‌ی جت یک لایه مرزی نازک را تولید می‌کند که تشکیل این لایه مرزی به دلیل وجود فشار خیلی زیاد در نقطه سکون به سمت دورتر از نقطه‌ی سکون شیفت پیدا می‌کند. این دلایل باعث بالاتر رفتن ضرایب انتقال حرارت می‌شوند. می‌توان گفت که با بزرگ شدن لایه مرزی به طور تصاعدی تاثیرات انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در قسمت (۱-۴-۱) بیشتر در مورد خصوصیات انتقال حرارت در لایه مرزی توضیح داده می‌شود.

### ۳-۱- تقسیم بندی جت‌های برخوردی

جت‌های برخوردی را می‌توان به دو گروه جت‌های برخوردی محدود<sup>۶</sup> و آزاد<sup>۷</sup> تقسیم کرد [۱۱۸] (شکل ۳-۱):

در جت‌های برخوردی محدود، در محل خروجی نازل، یک صفحه‌ی موازی سطح برخورد قرار دارد که روی میدان جریان تاثیر می‌گذارد. در جت‌های برخوردی آزاد چنین صفحه‌ی محدود کننده‌ای وجود ندارد. چنانچه در برخورد جت‌های محدود صفحه‌ی مذکور در فاصله‌ی دوری نسبت به صفحه‌ی هدف واقع شده باشد به طوری که روی میدان سیال تاثیر گذار نباشد، می‌توان سیستم را جت آزاد در نظر گرفت. جت‌های محدود در کاربردهای صنعتی رایج‌ترند. واضح است که در نوع محدود، جریان به دلیل محدودیت فضایی مجدداً روی دیواره برمی‌گردد. به همین دلیل انتقال حرارت در نوع محدود بهتر انجام می‌شود.

---

<sup>۶</sup> - Confined Jet

<sup>۷</sup> - Free Jet