



دانشکده مهندسی

گروه مکانیک

# **بررسی آزمایشگاهی ضریب پسای صفحه‌ی تخت در حضور مانع مربعی و مانع چهارگوش بهینه در مجاورت دیواره**

پایان نامه کارشناسی ارشد

**تهیه کننده: مهدی قاسمی**

**استاد راهنما: دکتر کهرم**

پائیز ۹۰

پایان‌نامه‌ی حاضر تحت عنوان:

## بررسی آزمایشگاهی ضریب پسای صفحه‌ی تخت در حضور مانع مربعی و مانع چهارگوش بهینه در مجاورت دیواره

که توسط آقای مهدی قاسمی تهیه و به هیأت داوران ارائه گردیده است، مورد تأیید کمیته تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک می باشد.

تاریخ دفاع : ۱۳۹۰/۸/۱۴ نمره: ۱۸/۵ درجه ارزشیابی: خیلی خوب

اعضای هیات داوران:

۱- دکتر محسن کهرم استاد راهنما دانشیار

۲- دکتر محمود پسندیده فرد استاد ممتحن دانشیار

۳- دکتر علیرضا تیمورتاش استاد ممتحن دانشیار

۴- دکتر محمد پسندیده فرد نماینده تحصیلات تکمیلی دانشیار

## تأییدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن بجز مواردی

که نام مرجع آورده شده است، نتیجه‌ی کار پژوهشی دانشجویی می‌باشد.

امضاء :

دانشجو : مهدی قاسمی

تاریخ :

امضاء :

استاد راهنما: آقای دکتر کهرم

تاریخ :

باشکر از خانواده ام، مخصوص پدر و مادر مهربانم که با پشتیبانی و حمایت همه جانبه خودشان مراد به اتمام رساندن این پایان نامه همواره امیدوار و دلگرم می کردند. باشکر از زحمات فراوان جناب آقای دکتر کرم که همچون پدری دلسوز و باوجدان مراد تمامی مراحل آزمایشگاهی، تئوری، محاسباتی و تحلیلی نتایج این پایان نامه را همایی و یاری کردند.

همچنین شکر فراوانی دارم از تمامی دوستانم که هر یک به نحوی با کمکها و یاری خود در تمامی مراحل، علی الخصوص در مرحله داده برداری، مراد پیشبرد این پایان نامه یاری دادند که بعزت کمبود جای کافی و جلوگیری از از قلم افتادن احتمالی نام برخی از این عزیزان، از ذکر نام تک تک آنها خودداری نمودم. امیدوارم روزی بتوانم زحمات همه می این بزرگان و عزیزان را جبران نمایم.

والحمد لله رب العالمین



بسمه تعالی

مشخصات رساله / پایان نامه تحصیلی دانشجویان  
دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان پایان نامه : بررسی آزمایشگاهی ضریب پسای صفحه‌ی تخت در حضور مانع مربعی و مانع چهارگوش بهینه در مجاورت دیواره

نام نویسنده : مهدی قاسمی

نام استاد راهنما : آقای دکتر کهرم

دانشکده : مهندسی

گروه : مکانیک

رشته تحصیلی : تبدیل انرژی

تاریخ تصویب : پاییز ۸۹

تاریخ دفاع: ۹۰/۸/۱۴

مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد ●

دکتري ○

تعداد صفحات: ۸۷

چکیده پایان نامه:

در دهه‌های اخیر تلاش‌های گسترده‌ای جهت کاهش نیروهای وارد بر هندسه‌های مختلف صورت پذیرفته است. یکی از مهمترین این تحقیقات، کاهش پسای وارد بر صفحه‌ی تخت از طریق قراردادن یک مانع در مجاورت صفحه می‌باشد. با قرارگیری مانع در مجاورت صفحه، لایه‌مرزی جریان روی صفحه با گردابه‌های صادرشده از مانع تعامل داشته و جریانی با ساختار دینامیکی بسیار پیچیده‌ای را به وجود می‌آورند. در این تحقیق آزمایشگاهی، نیروی پسای متوسط وارد بر صفحه‌ی تخت در سه حالت بدون مانع، با قرارگیری مانع مربعی در مجاورت صفحه و با قرارگیری مانع چهارگوش بهینه در مجاورت صفحه، اندازه‌گیری شده است. برای انجام آزمایشات، یک دستگاه تونل باد ساخته و برای اندازه‌گیری نیروها، یک مکانیزم اندازه‌گیری با استفاده از لودسل خمشی و نمایشگر طراحی گردیده است. نتایج این تحقیق نشان داده‌اند که با تغییر فاصله‌ی مانع از صفحه تا فاصله‌ی خاصی ضریب پسای متوسط صفحه کاهش پیدا کرده و از آن به بعد رو به افزایش می‌گذارد تا اینکه اثر وجود مانع از بین می‌رود. حداقل ضریب پسای مانع مربعی در فاصله‌ی ۲/۵ میلی‌متری از صفحه رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده برای ضریب پسای صفحه‌ی تخت در حضور مانع چهارگوش بهینه در مجاورت صفحه با نتایج کار عددی مقایسه شده‌اند. عدم قطعیت مربوط به ضریب پسا در حالت‌های مختلف محاسبه شده است.

کلید واژه:

۱- ضریب پسا

۲- صفحه‌ی تخت

۳- مانع مربعی

۴- مانع بهینه

امضای استاد راهنما:

## فهرست علائم

|                  |                               |
|------------------|-------------------------------|
| $C_d$            | ضریب پسا                      |
| $\overline{C_d}$ | ضریب پسای متوسط               |
| $\overline{C_L}$ | ضریب برآی متوسط               |
| $F_d$            | نیروی پسا ( $N$ )             |
| $f_d$            | نیروی پسا ( $gr$ )            |
| $G$              | فاصله مانع از صفحه ( $mm$ )   |
| $D$              | قطر مانع ( $mm$ )             |
| $D_h$            | قطر معادل مانع ( $mm$ )       |
| $Re$             | عدد رینولدز                   |
| $Re_D$           | عدد رینولدز بر مبنای قطر مانع |
| $V$              | سرعت ( $m/s$ )                |
| $G/D$            | نسبت فاصله                    |
| $T$              | دما ( $^{\circ}C$ )           |
| $u$              | عدم قطعیت                     |
| $K_u$            | فاکتور پوششی                  |

## علائم یونانی

|          |                                       |
|----------|---------------------------------------|
| $\mu$    | ویسکوزیتهی دینامیکی ( $kg/m.s^{-1}$ ) |
| $\rho$   | چگالی ( $kg/m^3$ )                    |
| $\delta$ | ضخامت لایه مرزی ( $mm$ )              |
| $\sigma$ | انحراف معیار                          |

## زیرنویس

|    |        |
|----|--------|
| cr | بحرانی |
|----|--------|

## فهرست

|    |   |
|----|---|
| ۱  | مقدمه   |
| ۳  | فصل اول: فناوری های کاهش پسا  |
| ۴  | ۱-۱ مقدمه   |
| ۴  | ۱-۲ کاهش پسا با تحریک لایه مرزی   |
| ۸  | ۱-۳ کاهش پسا با حلال های پلیمری   |
| ۹  | ۱-۴ کاهش پسا با محلول های پوشاننده سطح                                      |
| ۱۰ | ۱-۵ کاهش پسا با میکرو حباب ها   |
| ۱۱ | ۱-۶ پوشش دهنده های منعطف  |
| ۱۲ | ۱-۷ کاهش پسا با استفاده از پیوند چند روش                                    |
| ۱۲ | ۱-۷-۱ ترکیب کارکرد پلیمرها و میکرو حباب ها                                  |
| ۱۲ | ۱-۷-۲ ترکیب عملکرد پوشش دهنده های منعطف و پلیمرها                           |
| ۱۳ | ۱-۷-۳ ترکیب عملکرد روکش دهی منعطف، میکرو حباب ها و پلیمرها                  |
| ۱۳ | ۱-۷-۴ ترکیب عملکرد میکرو حباب ها و پوشش دهنده منعطف                         |
| ۱۳ | ۱-۸ روش های دیگر برای کاهش پسا  |
| ۱۴ | فصل دوم: پیشینه ی بررسی ساختار برهم کنش گردابه های ناشی از مانع و لایه مرزی |
| ۱۵ | ۱-۲ مقدمه   |
| ۱۵ | ۲-۲ مروری بر کارهای انجام شده روی برهم کنش گردابه ها و لایه مرزی            |
| ۲۵ | فصل سوم: معرفی بستر آزمایش، نحوه ی انجام آزمایشات و پردازش داده ها          |
| ۲۶ | ۱-۳ مقدمه   |
| ۲۶ | ۲-۳ آماده سازی بستر آزمون   |
| ۳۳ | ۳-۳ روش انجام آزمایشات  |
| ۳۵ | ۴-۳ کالیبراسیون لودسل و نمایش گر  |
| ۳۶ | ۳-۵ نحوه ی پردازش داده های بدست آمده از آزمایش                              |
| ۳۹ | فصل چهارم: عدم قطعیت مربوط به نتایج اندازه گیری                             |
| ۴۰ | ۱-۴ تعریف عدم قطعیت و روابط آن  |

|    |  |
|----|--|
| ۴۲ | ۲-۴ محاسبه‌ی عدم قطعیت مربوط به ضریب پسای متوسط  |
| ۴۶ | فصل پنجم: بررسی و تحلیل نتایج  |
| ۴۷ | ۱-۵ مقدمه  |
| ۴۷ | ۲-۵ اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از دستگاه   |
| ۴۹ | ۳-۵ بررسی ضریب پسای متوسط مانع بهینه   |
| ۵۱ | ۴-۵ بررسی اثر تغییر فاصله‌ی مانع از صفحه روی ضریب پسای صفحه‌ی تخت به ازای رینولدزهای مختلف |
| ۵۱ | ۵-۴-۱ مانع مربعی   |
| ۵۲ | ۵-۴-۲ مانع بهینه   |
| ۵۵ | ۵-۵ نتیجه‌گیری   |
| ۵۶ | ۶-۵ پیشنهاد برای پژوهش بیشتر   |
| ۵۷ | مراجع  |
| ۶۰ | پیوست الف: داده‌های آزمایشگاهی   |
| ۶۰ | الف-۱ نیروی پسای مانع مربعی  |
| ۶۱ | الف-۲ نیروی پسای مانع بهینه  |
| ۶۲ | الف-۳ نیروی پسای صفحه با قراردادن مانع مربعی در نزدیک صفحه                                 |
| ۶۸ | الف-۴ نیروی پسای صفحه با قراردادن مانع بهینه در نزدیک صفحه                                 |
| ۷۴ | پیوست ب: معرفی لودسل   |
| ۷۹ | پیوست پ: راهنمای کارکرد و تنظیم نمایش‌گر   |



## مقدمه

تحقیق و بررسی رفتار سیالات و عوامل و پارامترهای موثر بر آن همواره در قلمرو دانش مهندسی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده است. در بسیاری از کاربردهای صنعتی و غیر صنعتی، نیاز به کاهش ضریب اصطکاک و افزایش ضریب انتقال حرارت وجود دارد، مانند کاهش نیروی وارد بر بال‌های هواپیما، کاهش نیروی وارد بر یک سطح از طرف جریان، کاهش نیروی وارد بر هواپیما در هنگام فرود، افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی، تسریع جریان سردکردن قطعات الکترونیکی و ...

یکی از موضوعات مورد علاقه‌ی محققان در سالیان اخیر، بحث عدم تشابه بین ضریب انتقال حرارت و ضریب پسا می‌باشد. به عبارتی با تحریک لایه‌مرزی توسط قراردادن مانع در مجاورت دیواره، ضریب پسای صفحه کاهش یافته و ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. حق‌پرست [۱]، در پژوهشی عددی با استفاده از تکنیک‌های الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی، سطح مقطع مانع بهینه برای حداکثر ضریب انتقال حرارت را بدست آورد. با توجه به سختی کارهای آزمایشگاهی، تست آزمایشگاهی مانع بهینه‌ی حاصل از کار حق‌پرست دو قسمت شد. یک قسمت اندازه‌گیری ضریب پسای صفحه‌ی تخت در حضور این مانع بهینه و یک قسمت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت از صفحه‌ی تخت در حضور مانع بهینه تعیین گردید.

در این پروژه، تحریک لایه‌مرزی با استفاده از یک مانع با سطح مقطع مربعی و یک مانع چهارگوش بهینه به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته و نیروی پسای متوسط وارد بر صفحه‌ی تخت در حالت بدون مانع و با مانع با استفاده از لودسل<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده است. برای مقایسه با کارهای آزمایشگاهی مشابه، علاوه بر اندازه‌گیری ضریب پسای صفحه‌ی تخت در حالت بدون مانع، نیروی پسای متوسط وارد بر مانع در چند حالت نیز اندازه‌گیری شده و با داده‌های موجود معتبرسازی شده‌اند. تحقیقات زیادی در مورد بررسی جریان حول یک مانع با سطح مقطع‌های مختلف در مجاورت یک دیواره انجام شده‌است. برهم‌کنش گردابه‌های ناشی از حضور مانع با لایه‌مرزی دیواره، ساختار دینامیکی بسیار پیچیده‌ای بوجود می‌آورد. آقای سرکار<sup>۲</sup> [۲] دینامیک گردابه‌های ناشی از تعامل یک استوانه‌ی با مقطع دایروی در مجاورت دیواره را با استفاده از یک مدل LES سه بعدی مورد بحث و بررسی قرار داد. در این تحقیق اثر برهم‌کنش لایه‌مرزی با گردابه‌های ساطع شده از استوانه مورد بررسی قرار گرفته و ساختار جریان و

<sup>۱</sup>Load cell

<sup>۲</sup>Sarkar

دینامیک گردابه‌ها تحلیل شده است. آقایان جرارد بوش، کاپلر<sup>۱</sup> و رودی<sup>۲</sup> [۳]، آزمایشاتی در مورد جریان حول یک استوانه‌ی با مقطع مربعی در کنار دیواره انجام دادند. آزمایشات آنها در عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ (بر مبنای قطر استوانه D) انجام شد. آنها دریافتند که در نسبت فاصله‌ی  $G/D=0.35 - 0.5$ ، در کسری از زمان حرکت تناوبی صدور گردابه‌ها تغییر وضعیت می‌دهد. در نسبت فاصله‌ی کمتر از این مقدار، صدور گردابه‌ها کاملاً سرکوب شده و در نسبت فاصله‌ی با مقدار بیشتر، صدور گردابه‌ها بصورت منظمی انجام می‌گیرد.

در فصل اول پایان نامه به معرفی فناوری‌های کاهش پسا پرداخته شده است که با توجه به ماهیت بین رشته‌ای این مبحث روش‌های مختلفی در این فصل معرفی شده‌اند. در فصل دوم به پیشینه‌ی پژوهش در زمینه‌ی بررسی ساختار جریان حول مانع‌ها در مجاورت دیواره و برهم‌کنش گردابه‌های ناشی از مانع با لایه‌مرزی پرداخته‌ایم. در این فصل اکثر کارهای عددی و آزمایشگاهی انجام‌شده در این زمینه تا سال ۲۰۱۰ مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. فصل سوم از این پایان‌نامه به معرفی دستگاه تونل باد مورد استفاده در آزمایش، تجهیزات اندازه‌گیری و مکانیزم‌های طراحی‌شده جهت اندازه‌گیری پارامترها، روش آزمایش‌ها و همچنین نحوه‌ی پردازش داده‌ها از جمله بررسی رابطه‌ی ضریب پسا و ساده‌سازی آن با توجه به مانع و شرایط آزمایش پرداخته است. در فصل چهارم عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری‌ها تشریح شده و در نهایت در فصل آخر، فصل پنجم، نتایج، نمودارها و تحلیل آنها آورده شده‌است.

---

<sup>۱</sup>Kappler

<sup>۲</sup>Rodi

## فصل اول

### فناوری‌های کاهش پسا

## ۱-۱ مقدمه

در چند دهه‌ی گذشته، در اکثر دانشگاه‌های دنیا، تحقیقات زیادی روی کاهش نیروی پسا<sup>۱</sup> و روش‌های مختلف انجام این کار، صورت پذیرفته است. با توجه به شرایط جریان و هندسه‌ی آن، روش‌های متنوعی برای کاهش نیروی پسای وارده از طرف جریان یافت شده است. برخی از این روش‌ها عبارتند از:

کاهش پسا با تحریک لایه‌مرزی

کاهش پسا با حلال‌های پلیمری

کاهش پسا با محلول‌های پوشاننده سطح

کاهش پسا با میکروحباب‌ها

کاهش پسا با پوشش دهنده‌های منعطف

## ۱-۲ کاهش پسا با تحریک لایه مرزی

تحریک لایه‌مرزی از روش‌هایی است که با استفاده از پدیده‌های سیالاتی مانند دنباله، جت سیال درون لایه مرزی و ... برای کاهش پسا به کار گرفته می‌شود. یکی از روش‌هایی که برای ایجاد این پدیده‌ها به کار می‌رود، قراردادن موانع مختلف در داخل لایه‌مرزی می‌باشد.

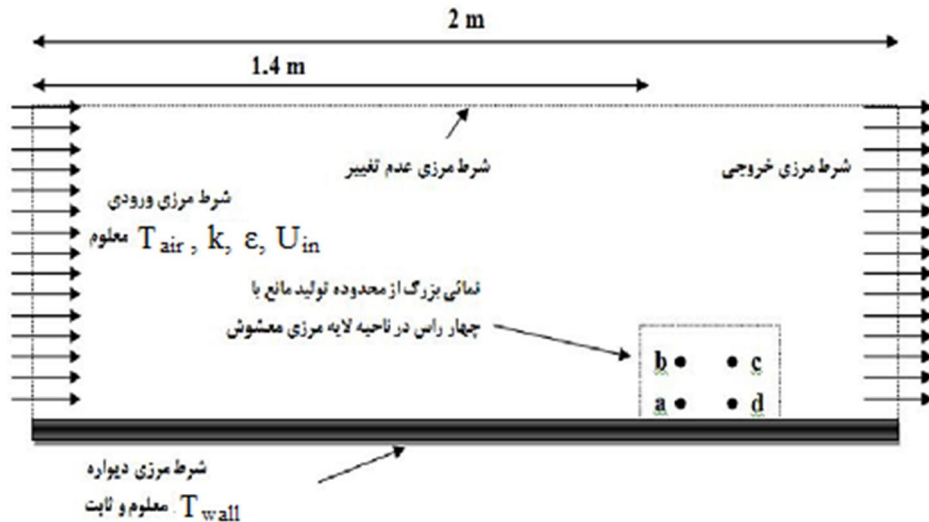
فریور<sup>۲</sup> [۴]، در پژوهشی لایه‌مرزی آشفته روی صفحه‌ی تخت که توسط یک مقطع مستطیلی تحریک شده را بررسی کرد و نشان داد تحریک لایه‌مرزی دو قسمت و یک<sup>۳</sup> فوقانی و پایینی پشت مقطع را از یکدیگر جدا می‌کند. همچنین اثر جداکننده بر تحریک لایه‌مرزی را بررسی نمود. حق پرست [۱]، با انجام تحقیقاتی اثر تحریکی مانع‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای بر لایه‌مرزی مغشوش را بررسی و به این نتیجه رسید که هرگاه مانعی بر روی صفحه تخت قرار گیرد، به نحوی که بر جریان روی صفحه تأثیرگذار باشد، همواره باعث تغییر در ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک سطح خواهد شد. به طور کلی وقتی جریانی به مانعی در نزدیکی سطح برخورد می‌کند، در صورتی که جریان به صورت عمودی به مانع برخورد نماید، یک نقطه سکون در جلوی مانع تشکیل خواهد شد، و در زیر مانع یک جت خواهیم داشت

<sup>۱</sup> Drag force

<sup>۲</sup> Farievar

<sup>۳</sup> Wake

که این نقطه سکون مقدار زیادی از جریان را به پایین هدایت کرده و جت سیال را به شدت تقویت می‌کند. همچنین شاهد تشکیل گردابه‌هایی در پشت مانع هستیم. تشکیل جت سیال در زیر مانع باعث از بین رفتن لایه مرزی بر روی صفحه شده، و این جت به جریان سیال زیر مانع سرعت می‌دهد. در همین راستا چند دسته آزمایش را انجام داد. او با تغییر مکان رئوس مانع در شکل ۱-۱، در ابتدا تأثیر تغییر زاویه‌ی ضلع بالائی و ارتفاع مانع دوزنقه‌ای و سپس تأثیر تغییرات طول مانع را بررسی نمود.



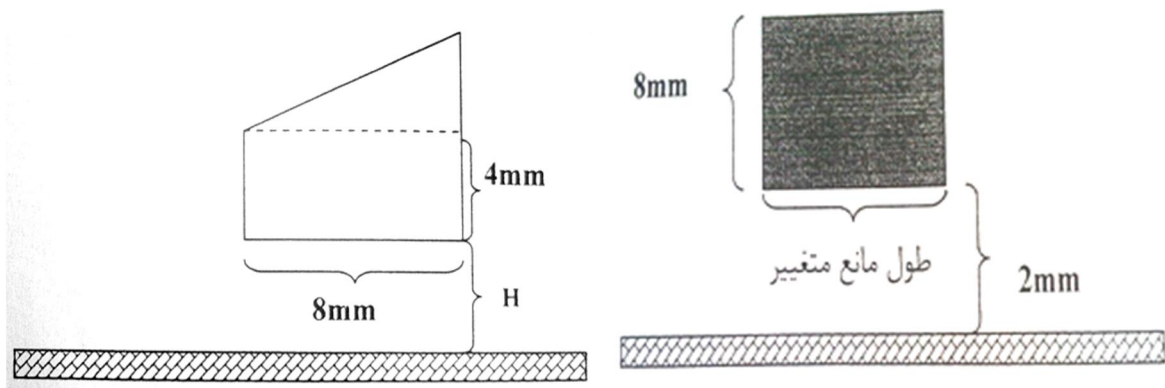
شکل ۱-۱ هندسه‌ی مانع و شرایط مرزی استفاده‌شده در حل عددی (برگرفته‌شده از مرجع [۱])

برای انجام این آزمایش از یک مانع دوزنقه‌ای با طول ۸ میلی‌متر استفاده شده است. این آزمایش را در دو حالت و برای سه زاویه نمونه انجام داد. برای بررسی تأثیر تغییرات طول مانع از یک مانع مستطیلی استفاده نمود. همان طور که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود این مانع را در فاصله ۲ میلی‌متری از صفحه تخت قرار داد و ارتفاع مانع را برابر با ۸ میلی‌متر در نظر گرفت. همچنین در مورد مانع دوزنقه‌ای با هندسه نشان داده شده در شکل ۱-۳ بررسی‌های زیر را انجام داد:

(۱) بررسی اثر تغییرات رینولدز جریان در پدیده تحریک لایه مرزی معشوش

(۲) بررسی تأثیر ابعاد و زوایای مانع دوزنقه‌ای

(۳) بررسی تأثیر تغییرات فاصله مانع از صفحه تخت



شکل ۱-۲ هندسه مانع مربعی (برگرفته از مرجع [۱]) شکل ۱-۳ هندسه مانع ذوزنقه‌ای (برگرفته از مرجع [۱])

همچنین با توجه به نتایجی که بدست آورد نشان داد که با افزایش رینولدز جریان، اثر گردابه‌ها و جت سیال زیاد شده و به عبارتی اثر جت تقویت شده و فاصله دو گردابه از هم با زیاد شدن رینولدز بیشتر می‌شود و در تحقیقی دیگر در مورد مانع مربعی نشان داد که عبور جریان از مانعی که داخل لایه مرزی قرار می‌گیرد (موانع نزدیک سطح)، موجب ایجاد گردابه بعد از مانع، جت در زیر مانع (نزدیک دیواره)، نقطه سکون در پیشانی (محل برخورد با مانع) و منطقه بازگشت در پشت مانع در فاصله دورتر می‌گردد. ورود جت در زیر مانع باعث از بین رفتن روند رشد لایه مرزی شده و جریان با سرعت بیشتری در کنار دیواره به حرکت در می‌آید. به عبارت دیگر حرکت جت، لایه مرزی را شستشو می‌دهد.

فرهبد و خدادادزاده [۵]، یک مانع با مقطع چهارگوش را در مسیر جریان آزاد قرار دادند و تأثیر نسبت ابعادی چهارگوش در شکل‌گیری و تعداد گردابه‌های رها شده از انتهای مانع بر حسب تغییرات نسبت ابعادی را مورد بحث و بررسی قرار دادند و همچنین با کاهش فاصله مانع تا صفحه تخت و قرار دادن آن به صورت کامل در لایه مرزی نشان دادند که در ابتدا گردابه‌ها روی مانع تشکیل شده و سپس در امتداد طول آن جابه‌جا می‌شوند ولی بعد از مدت زمانی که جریان به حالت پایدار می‌رسد گردابه‌ها روی لبه پایینی مانع دیگر تشکیل نمی‌شوند و فقط در لبه بالایی مانع و در لبه پایین دست آن گردابه وجود دارد. گردابه در لبه بالایی مانع بر روی سطح آن جابجایی ندارد و رها شدن گردابه در پشت مانع نیز بسیار ضعیف می‌شود و به منظور قابل مقایسه کردن نتایج این تحقیق با برخی نتایج دیگر، جریان هوا با سرعت  $14 \text{ m/s}$  (عدد رینولدز مقطع مورد مطالعه  $1.0 \times 10^5 / 4$ ) و دمای  $20^\circ \text{C}$  به موازات صفحه تخت با دمای ثابت  $58^\circ \text{C}$  را مورد بررسی قرار دادند و یک مانع چهارگوش به ضخامت  $t=8 \text{ mm}$  و طولهای  $16$ ،  $32$ ،  $40$  و  $52$  میلی‌متر در فاصله  $L=135 \text{ cm}$  از ابتدای صفحه تخت در فواصل عمودی متفاوت  $2$ ،  $6$ ،  $11$ ،  $22$  و  $50$  میلی‌متر از صفحه تخت قرار دادند. یک مانع مستطیلی در مسیر جریان آزاد قرار داده و تأثیر نسبت

ابعادی مانع چهارگوش و همچنین فاصله آن از سطح صفحه تخت در شکل‌گیری و تعداد گردابه‌های رها شده از انتهای مانع را مورد بحث و بررسی قرار دادند. سپس مانع مستطیلی را به سمت صفحه تخت که با جریان اصلی در حال تبادل گرما است، حرکت دادند و اثر فاصله از صفحه تخت و نسبت ابعادی مانع چهارگوش را روی لایه‌مرزی و شکل‌گیری گردابه‌ها مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین نشان دادند که یکی از روش‌های موثر تحریک لایه‌مرزی مغشوش بر روی یک دیواره، استفاده از یک جسم خارجی در محدوده لایه‌مرزی است. در این روش یک چهارگوش یا شکل‌های دیگر را در درون لایه مرزی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند جریان پس از رسیدن به مانع و برخورد با آن ابتدا یک نقطه سکون تشکیل داده و در ادامه در مسیر خود از دو طرف مانع می‌گذرد. قسمت هدایت شده به مجرای میان مانع و صفحه‌ی تخت، به صورت یک جت، لایه‌مرزی روی صفحه تخت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. سرعت این جت تا دو برابر سرعت جریان برخوردی به مانع می‌رسد و در شستشوی لایه‌مرزی بسیار موثر است. قسمت دیگر که به سمت دورتر جسم از صفحه تخت حرکت کرده است، با توجه به طول مانع ابتدا منطقه جدایش روی مانع و سپس تعدادی گردابه روی دیواره مانع تشکیل داده و بالاخره در ادامه‌ی راه خود در پشت مانع تشکیل یک گردابه می‌دهد. این گردابه به نوبه‌ی خود در تحریک لایه‌مرزی پس از جسم موثر می‌باشد. به طور خلاصه در چنین فرایندی در بالادست مانع یک نقطه سکون، در زیر مانع در حد فاصل صفحه تخت و مانع یک جت و در پایین دست مانع یک منطقه ویک تشکیل می‌شود. هر یک از این عوامل به شکل خاصی در تغییر رفتار لایه‌مرزی موثر هستند. بسیاری از نتایج نشان می‌دهند که در نتیجه انجام پرش و سپس بازچسب لایه‌مرزی در لبه آغازین مانع، و در ادامه روی بدنه مانع، گردابه‌هایی تشکیل می‌شوند که بر روی دیواره حرکت کرده به پشت مانع راه می‌یابند. طول ناحیه‌ی پرش، تابع اندازه ضلع مانع مواجه با جریان و تعداد گردابه‌ها تابع طول مانع در امتداد جریان است. میلز<sup>۱</sup> و همکاران [۶]، جریان روی یک مانع با مقطع مربعی موازی با دیواره را مورد بررسی قرار دادند. همچنین بررسی جریان سیال عبوری از روی مانع مربعی و برخورد جت و دنباله در پشت موانع و بررسی اندازه ضخامت لایه‌مرزی بررسی در بالادست و پایین‌دست جریان توسط سوهانکار<sup>۲</sup> و نوربرگ<sup>۳</sup> [۷] مطالعه شده است. مودی<sup>۴</sup> [۸] پدیده جدایش جریان و برخورد جت و دنباله را در پشت موانع و ضخامت لایه‌مرزی را در بالادست و پایین

---

<sup>1</sup> Mills

<sup>2</sup> Sohankar

<sup>3</sup> Norberg

<sup>4</sup> Modi

دست جریان بررسی نمود. در مورد دنباله و جریان گردابه های پشت مانع مربعی در اثر جریان عبوری از آن به صورت آزمایشگاهی و عددی توسط داویس<sup>۱</sup> [۹] و محققان مختلف بررسی شده است.

## ۱-۳ کاهش پسا با حلال های پلیمری

امروزه حلال‌های پلیمری در سیستم‌های کاهش پسا به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. چند نمونه از پلیمرهایی که در زمینه حلال‌های مورد استفاده در کاهش پسا در جدول ۱-۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱-۱ حلال‌هایی که در کاهش پسا کاربرد دارند. (برگرفته از مرجع [۱۰])

| محلول های حلال پلیمری   | پلیمرهای حل شونده در آب  |
|---|--|
| Polyisobutylene<br>Polystyrene<br>Poly(methyl methacrylate)<br>Polydimethylsiloxane<br>Poly(cis-isoprene) | Poly(ethylene oxide)<br>Polyacrylamide<br>Guar gum<br>Xanthan gum<br>Carboxymethyl cellulose<br>Hydroxyethyl cellulose |

آزمایش‌ها نشان داده است که هر چه وزن مولکولی<sup>۲</sup> یک پلیمر، به عنوان کاهنده‌ی پسا، بیشتر شود، تأثیر آن بیشتر می‌شود. به بیان دیگر، افزایش وزن مولکولی، کاهش پسا را برای غلظت و عدد رینولدز مشخصی همراه دارد. پلیمرهایی که زنجیره‌های طولانی‌تری دارند، شانس بیشتری برای درگیری و کشش متقابل با جریان ایجاد می‌کنند، این مسئله که گستره زنجیره پلیمر برای کاهش پسا بسیار اهمیت دارد، محرز شده است. مؤثرترین پلیمرهای کاهنده‌ی پسا عمدتاً ساختار خطی دارند. پلی‌اکریلامید، پلی‌ایزوبولیتن، پلی‌اتیلن، نمونه‌های مشخص پلیمرهای خطی می‌باشند. پلیمرهایی که ساختار خطی ندارند، در کاهش پسا مؤثر نمی‌باشند [۱۰].

## ۱-۳-۱ مکانیزم‌ها

تئوری‌هایی برای بیان چگونگی روبه‌روشدن مولکول‌های پلیمر با تولید و رشد و انتقال اغتشاشات درهمی ارائه گردیده‌اند. زنجیره‌ی هیدرودینامیکی پلیمر مانع از گسسته‌شدن میکروحباب‌های تولید شده در جریان آشفته می‌شود. این تئوری‌ها بسیاری از تغییرات مشاهده شده در ساختار جریان در طی کاهش

<sup>1</sup> Davis

<sup>2</sup>molecular weight



پسا را بیان می‌کنند. تولاین<sup>۱</sup> [۱۱] بیان کرد که کاهش پسا به نرخ کرنش مولکول‌ها در جریان بستگی دارد. در نرخ کرنش‌های بالا، زنجیره پلیمر به گسترش یافتن در جهت محور اصلی متمایل می‌گردد و همزمان شکلی از کرنش سختی اتفاق می‌افتد که باعث افزایش لزجت کشسانی می‌شود. این افزایش لزجت از رشد اغتشاشات در جریان کنار دیواره جلوگیری کرده و در نتیجه پسا کاهش می‌یابد. اگرچه بسیاری محققان احساس می‌کنند که بسط مولکولی در کاستن اغتشاشات دخیل است، هنوز در این مورد اجماعی وجود ندارد. بسیاری جنبه‌های کاهش پسا از جمله شدت رقیق‌کردن حلال پلیمری و طبیعت تعریف نشده‌ی جریان درهم، آن را به مفهومی پیچیده برای توضیح تبدیل کرده است. پیچیدگی‌های این پدیده باعث شده است که بعضی محققان به این باور برسند که بیش از یک نوع مکانیزم کاهنده‌ی پسا باید وجود داشته باشد.

## ۱-۴ کاهش پسا با محلول‌های پوشاننده سطح

پوشش دهنده‌های سطح، موادفعال در سطح هستند که جزء اصلی‌شان، صابون، و مواد شوینده است. صرف نظر از صابون‌های کلاسیک (ومعمول) که نمک قلیایی اسید چرب بالاترند، مواد فعال در سطح، چندین سال است که مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مواد فعال در سطح شامل بخش اصلی قطبی (آب‌سوت)<sup>۲</sup> و بخش غیر قطبی (غیرآب‌سوت)<sup>۳</sup> می‌باشند. بسته به شارژر سرحلقه، مواد فعال در سطح، به سه دسته کاتیونی، آنیونی و غیرقطبی تقسیم می‌شوند. وقتی غلظت حلال فعال در سطح از مقداری بحرانی فراتر می‌رود، مولکول‌های فعال در سطح شروع شکل دادن توده ای به نام میسل<sup>۴</sup> می‌کنند. پیوند مولکول‌ها به میسل‌ها، برگشت‌پذیر است، یعنی وقتی غلظت به حد بحرانی می‌رسد، میسل‌ها شروع به تفکیک شدن به مولکول‌ها می‌کنند. میسل‌ها همیشه با مولکول‌ها در تعادل ترمودینامیک هستند. بسته به ساختار مولکول، غلظت و نوع حلال، سه شکل هندسی برای میسل‌ها قابل تشخیص است، کروی، میله‌ای و دیسکی‌شکل. توانایی کاستن پسا در مواد حلال فعال در سطح، بسیار به شکل این میسل‌ها بستگی دارد.

<sup>۱</sup> Tulin

<sup>۲</sup> hydrophilic

<sup>۳</sup> hydrophobic

<sup>۴</sup> micelle

## ۱-۵ کاهش پسا با میکروحباب‌ها

میکروحباب‌ها، لایه‌مرزی را تصحیح کرده و به کاهش اصطکاک سطح کمک می‌کنند و در سال‌های اخیر به صورت وسیع در زمینه تحقیقات زیردریایی‌ها بدان پرداخته شده است. تزریق‌گاز به لایه‌مرزی درهم، پسای اصطکاکی را بیش از 80% کاهش می‌دهد. همچنین می‌دانیم که یک لایه‌ی هوا چسبیده به سطح آب ضریب پسای آشفستگی را کاهش می‌دهد [۱۰]. موضوع تحریک لایه‌مرزی به کمک میکروحباب‌ها با کار مک‌کورمک<sup>۱</sup> و پاتچاریا<sup>۲</sup> آغاز شده است [۱۲]. آنها از سیم مسی که دوره‌سته‌های چرخان پیچیده شده بود، برای ساختن حباب‌های هیدروژن توسط الکترولیت استفاده کردند. آزمایش آنها نشان داد که میکروحباب‌ها پسای کلی را کاهش می‌دهند و با افزایش تولید گاز، کاهش پسا افزایش می‌یابد. اما این نتایج محدود به اعداد رینولدز بین  $0.3 - 1/8$  میلیون بود. سپس چندین آزمایش در اتحاد جماهیر شوروی انجام شد که کاهش پسای قابل توجهی در لایه‌مرزی تونل‌آب با تزریق حباب‌های هوا، از صفحات متخلخل هم‌تراز بدست آمد. در سال ۱۹۸۰ یک دوره مطالعات سیستماتیک در تونل‌های آب برای کاهش پسا روی دیواره مسطح توسط میکروحباب‌های تولید شده توسط صفحات متخلخل صورت گرفت و بر روی حلقه‌های متقارن محوری که اطرافش متخلخل بود، نیز همین مسئله مورد بررسی قرار گرفت. کاتو<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۳] چندین آزمایش با میکروحباب‌ها در لایه مرزی صفحه تخت انجام داده‌اند. برای غلبه بر محدودیت‌های عملی صفحات متخلخل رایج، همچون انرژی تزریق بالا و لجن‌های دریایی وقتی در زیردریایی‌ها استفاده می‌شود، یک شیوه تزریق جدید با استفاده از یک شکاف به کارگرفته شده است. مارکل<sup>۴</sup> و داچ<sup>۵</sup> [۱۴] نشان دادند که اندازه‌ی حباب‌ها پارامتری اساسی می‌باشد. قطر حباب‌ها، غلظت و موقعیت‌شان در لایه‌مرزی، بر روی تزریق‌شان اثر می‌گذارد.

اندازه‌ی حباب‌ها در توده‌ی میکروحباب، تابع یکی از سه مکانیزم رقیب زیر می‌باشد: شکل‌گیری اولیه در دیواره، شکافته‌شدن حباب تحت تأثیر آشفستگی و درهم آمیختگی حباب براساس تصادف. مهمترین مشخصه اندازه‌ی حباب‌ها، مقایسه‌ی قطرشان و ضخامت لایه‌مرزی می‌باشد. مارکل و داچ [۱۴] نشان دادند که اندازه‌ی حباب‌ها ( $500-1200 \mu m$ ) در محدوده‌هایی بیش از مرتبه بزرگی ضخامت زیرلایه ( $10 \mu m$ ) و کوچکتر از مرتبه بزرگی لایه‌مرزی (حدود  $10 mm$ ) می‌باشد.

<sup>1</sup> Mc.Cormick

<sup>2</sup> Bhattacharyya

<sup>3</sup> Kato

<sup>4</sup> Merkle

<sup>5</sup> Deutsch

گرچه تأثیر میکرو حباب‌ها اثبات شده و اندازه‌ی حباب‌ها به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای موثر در کاهش پسا تشخیص داده شده است، هنوز مکانیسم کلی منجر به این کاهش، روشن نشده است. کاتو و همکارانش [۱۵] در مورد اثر کاهش پسا به علت ورود میکرو حباب‌ها به کانال آب دو بعدی تحقیق نموده اند. این مطالعات رابطه‌ای بین کارایی کاهش پسا و غلظت میکرو حباب‌ها در کنار دیواره برقرار نموده است. قایق‌های رودخانه‌ای و کشتی‌هایی که به سیستم‌های تزریق هوا مجهز شده‌اند، کاهش اصطکاک سطح در حدود ۱۵-۱۰٪ را نشان داده‌اند [۱۶].

## ۱- پوشش دهنده های منعطف<sup>۱</sup>

به نظر می‌رسد که دلفین‌ها ضریب پسای پایین غیر معمولی داشته باشند. مشاهده توانایی‌های شنا کردن شگفت‌انگیز دلفین‌ها منجر به این شد که کرامر<sup>۲</sup> [۱۷] نخستین پوشش دهنده منعطف را طراحی کند. کرامر ادعا کرد که پوشش دهنده‌ی منعطف اختراعی‌اش پسا را بیش از ۶۰٪ کاهش می‌دهد. کرامر مدل خود را با یک یدک‌کش پشت یک قایق موتوری قرار داد. نمونه‌ای که توسط کرامر طراحی شده، شامل یک پوسته داخلی قابل انعطاف، یک دیافراگم خارجی و قطعات کوچک بود که همگی از لاستیک فوم طبیعی ساخته شده بودند. فضای بین پوسته داخلی و دیافراگم خارجی با سیالی با ویسکوزیته و استهلاک بالا پر شده بود. از آزمایش‌های مقدماتی او مشخص شد که کاهش پسا مربوط به تأخیر گذار از لایه‌مرزی آرام به درهم در رینولدزهای بالا می‌باشد. پس از انتشار کارهای ابتدایی کرامر در سال ۱۹۶۰، کاهش پسا با پوشش‌دهنده‌های منعطف به موضوع متداول برای تحقیقات تبدیل شد. چندین تحقیق [۱۸] که در واقع ادامه کار بر روی نتایج کرامر بود، انجام شد، اما هیچ کاهش پسای مهمی بدست نیامد. پس از آن محققان به این نتیجه رسیدند که نتایج کرامر اشتباه بوده و ممکن است بر اثر وضع تصادفی روغن سیلیکونی که در سیال مستهلک کننده در طول تست استفاده شده است، خطایی رخ داده باشد. هرچند مدل‌های تئوری نشان داده بودند که امکان دارد که لایه‌مرزی آرام پایدارتر شده و گذار از جریان آرام به درهم به تأخیر افتد، اما آزمایش‌ها بر مدل دیواره پوشش داده شده توسط پوشش دهنده‌های منعطف در جریان هوا و آب هیچ نتیجه‌ی قطعی به همراه نداشت. در سال ۱۹۷۰، چندین بار پوشش دهنده‌ی ویسکوز در آب، در مرکز تحقیقات دریایی مورد آزمایش قرار گرفت. در آزمایشگاه تحقیقات دریایی و مرکز دفاعی زیردریایی [۱۹] در هیچ موردی، نتیجه‌ی مهمی در اندازه‌گیری کاهش پسا بدست

<sup>۱</sup> Compliant Coatings

<sup>۲</sup> Kramer

نیامد. تا سال ۱۹۸۵ که تحلیل‌های دقیقی توسط کارپنتر<sup>۱</sup> و گاراد<sup>۲</sup> [۲۰] انجام شد و آزمایش‌های کاملاً کنترل شده‌ای توسط گاستر<sup>۳</sup> [۲۱] برای نخستین بار قابلیت تأخیرگذار در پوشش دهنده‌های سطح را به صورت مستقیم تأیید می‌کرد. این کارها، ادعای اولیه کرامر را تصدیق کرد و توضیح قابل قبولی برای شکست تجربیات آزمایشگاهی بعدی ارائه داد.

## ۷-۱ کاهش پسا با استفاده از پیوند چند روش

هر چند که ترکیب کردن روش‌های مختلف می‌تواند به نتایج خوبی منجر شود، روش‌های ترکیبی کمی مورد تحقیق قرار گرفته است.

### ۷-۱-۱ ترکیب کارکرد پلیمرها و میکروحبابها

توانایی بیشتر کردن کاهش پسا، فراتر از هر یک از اجزای ترکیب و به موجب آن ایجاد تأثیر مشترک، این موضوع را به ذهن متبادر می‌سازد که حباب‌ها می‌توانند زنجیره پلیمر را گسترده‌تر کرده و یا اینکه پلیمرها تجمع حباب‌ها در نزدیک دیواره را بهبود بخشند. مالیوگا<sup>۴</sup> و همکاران [۲۲] دریافتند که تشدید متقابل کاهش پسا بین میکروحباب‌ها و پلیمرها وجود دارد. آن‌ها این‌گونه دریافتند که پلیمرها در جریان از به هم آمیختگی و پخش شدن ناگهانی حباب‌ها پیشگیری می‌کنند. در نتیجه سطوح مختلف کاهش پسا توسط پاشش حلال پلیمری، کاهش پسای اندازه‌گیری شده با هوای تنها یا پلیمر تنهای تزریقی به لایه مرزی را افزایش می‌دهد.

### ۷-۱-۲ ترکیب عملکرد پوشش دهنده‌های منعطف و پلیمرها

سمنف<sup>۵</sup> و همکارانش [۲۳] تحقیق گسترده‌ای روی تأثیر ترکیب روکش منعطف و پلیمرها انجام داده است. پلیمر مورد استفاده‌ی آنها در این تحقیق PEO<sup>۶</sup> بوده است. بسته به غلظت‌های PEO، ضخامت روکش‌کننده، ماده‌ی روکش‌کننده و سرعت انجام تست، سه حالت قابل مشاهده است:

با ترکیب روش‌ها، با روکش‌دهی منعطف و با پلیمر می‌باشد.

$$\Psi_{cp} > \Psi_c + \Psi_p \quad \text{و} \quad \Psi_{cp} < \Psi_c + \Psi_p \quad \text{و} \quad \Psi_{cp} = \Psi_c + \Psi_p$$

که  $\Psi_{cp}$ ،  $\Psi_c$ ،  $\Psi_p$  به ترتیب کارایی کاهش پسا

<sup>1</sup> Carpenter

<sup>2</sup> Garrard

<sup>3</sup> Gaster

<sup>4</sup> Malyuga

<sup>5</sup> Semenov

<sup>6</sup> PolyEthylene Oxide