

الله أكبر



دانشگاه آزاد اسلامی  
واحد تهران مرکزی  
دانشکده مهندسی - گروه مکانیک

عنوان:

انتقال حرارت از دو استوانه بادامکی شکل کنارهم در بین دو صفحه موازی  
در جریان مغشوش

استاد راهنما:

دکتر آرش میر عبدالله لواسانی

استاد مشاور:

دکتر محمد افتخاری یزدی

دانشجو:

کیوان حاجی آقابالازاده

تابستان ۱۳۹۳

## تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی یاور و پشتیبانم هستند.

## سپاسگزاری:

سپاس بی پایان مخصوص خدایی است که بشر را آفریده و به او قدرت اندیشیدن داده و او را امر به تلاش و کوشش نموده است.

سپس لازم است کمال تشکر را از استاد ارجمند جناب آقای دکتر آرش میر عبدالله لواسانی به خاطر سعه صدر و رهنمودهای دلسوزانه ایشان داشته باشم.

# فهرست مطالب

## فصل اوّل : مقدمه

- ۱-۱- جریان آشفته ..... ۲
- ۲-۱- اهمیت جریان و انتقال حرارت حول دو استوانه کنار هم ..... ۶
- ۳-۱- تاریخچه مطالعات و تحقیقات انجام شده ..... ۷

## فصل دوّم: معادلات حاکم و شرایط مرزی

- ۱-۲- معادلات حاکم بر جریان آشفته ..... ۱۲

## فصل سوم : روش عددی

- ۱-۳- تولید شبکه محاسباتی و تعریف شرایط مرزی ..... ۱۷
- ۳-۱-۱- دو استوانه مدور ..... ۱۷
- ۳-۱-۲- دو استوانه بادامکی ..... ۲۰
- ۳-۲- مراحل حل مساله ..... ۲۵
- ۳-۳- تعیین شرایط مرزی در نرم افزار ..... ۲۷
- ۳-۴- انتخاب مدل آشفتگی و بررسی اعتبار نتایج ..... ۲۸
- ۳-۵- تحلیل حل پایا و ناپایا و بررسی اعتبار نتایج ..... ۳۱
- ۳-۶- تعیین روشهای گسسته سازی ..... ۳۱

۳۲ ..... ۷-۳- اجرای حل و تعیین زمان تکرارها

## فصل چهارم : نتایج و بحث

۳۵ ..... ۱-۴- اعتبارسنجی نتایج برای دو استوانه مدور

۳۵ ..... ۱-۱-۴- ضریب درگ

۳۷ ..... ۲-۱-۴- عدد ناسلت

۳۸ ..... ۲-۲- دو استوانه بادامکی

۳۸ ..... ۱-۲-۴- تاثیر عدد رینولدز و فاصله بین دو استوانه بادامکی بر ضریب درگ و لیفت

۴۲ ..... ۲-۲-۴- توزیع فشار روی سطح استوانه بادامکی به ازای  $T/D_{eq}$  های متفاوت

۴۵ ..... ۳-۲-۴- تغییرات ضریب درگ محلی روی سطح استوانه بادامکی

۴۷ ..... ۴-۲-۴- تغییرات عدد ناسلت محلی روی استوانه بادامکی

۴۹ ..... ۵-۲-۴- عدد ناسلت متوسط

۵۰ ..... ۶-۲-۴- کانتورهای سرعت و فشار در  $T/D_{eq}$  های مختلف

۵۳ ..... ۷-۲-۴- کانتور دما در رینولدزهای مختلف

۵۵ ..... ۸-۲-۴- کانتورهای سرعت در رینولدزهای مختلف

۵۷ ..... ۳-۴- عملکرد هیدرولیکی - حرارتی لوله بادامکی

۵۹ ..... ۴-۴- مقایسه استوانه های بادامکی با استوانه های دایروی

۶۱ ..... ۵-۴- تاثیر دو صفحه موازی بر جریان سیال

۶۱ ..... ۱-۵-۴- ضریب درگ

۶۲ ..... عددناست ۲-۵-۴

۶۴ ..... عملکرد هیدرولیکی - حرارتی ۳-۵-۴

## نتیجه گیری

۶۸ ..... پیشنهادات برای کارهای آینده

۶۹ ..... مراجع

## فهرست علائم اختصاری

$m^2$  ..... سطح مقطع تبادل گرما،  $A$

$C_p$  ..... ضریب فشار

$C_L$  ..... ضریب لیفت

$C_D$  ..... ضریب درگ

$D$  ..... قطر استوانه مدور،  $m$

$D_{eq}$  ..... قطر معادل استوانه بادامکی،  $m$

$F_D$  ..... نیروی درگ

$F_L$  ..... نیروی لیفت

$h$  ..... ضریب انتقال گرمای جابجایی،  $W/m^2K$

$k$  ..... ضریب رسانش حرارتی،  $W/m.K$

$T$  ..... فاصله بین استوانه ها،  $m$

$Nu$  ..... عدد ناسلت

$Nu_{Local}$  ..... عدد ناسلت محلی

$p_s$  ..... فشار سطح استوانه،  $Pa$

$p_\infty$  ..... فشار محیط،  $Pa$

$q$  ..... میزان انتقال حرارت،  $W$

$Re$  ..... عدد رینولدز

$T$  ..... دمای سیال،  $k$

$t$  ..... زمان،  $S$

$U$  ..... مولفه سرعت در امتداد جریان،  $m/s$

$V$  ..... مولفه سرعت عمود بر امتداد جریان،  $m/s$

$x$  ..... مختصات در امتداد جریان

$Y$  ..... مختصات عمود بر امتداد جریان



## علائم یونانی

- $\alpha$  ..... ضریب پخش حرارتی
- $\theta$  ..... دمای بدون بعد
- $\nu$  ..... لزجت سینماتیکی
- $\rho$  ..... چگالی

## فهرست جداول

- جدول (۱-۳) - مقدار سرعت ورودی برای رینولدزهای مختلف ..... ۱۸
- جدول (۲-۳) - مقایسه تعداد مش های مختلف برای استوانه دایروی اول ..... ۱۹
- جدول (۳-۳) - مقدار سرعت ورودی برای رینولدزهای مختلف ..... ۲۲
- جدول (۴-۳) - مقایسه تعداد مش های مختلف برای استوانه بادامکی اول ..... ۲۲
- جدول (۵-۳) - مقایسه نتایج مدل های آشفتگی برای استوانه دایروی ..... ۲۸
- جدول (۶-۳) - مقایسه نتایج حل پایا و ناپایا برای استوانه دایروی ..... ۳۱
- جدول (۷-۳) - مقایسه نتایج الگوریتم های حل برای دو استوانه دایروی ..... ۳۲
- جدول (۸-۳) - مقدار گام زمانی (Time Step size) برای رینولدزهای مختلف ..... ۳۲

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) - مقایسه پدیده پخش رنگ در دو جریان آرام و آشفته..... ۴
- شکل (۲-۱) - چگونگی شکل گیری گرادیان فشار معکوس و جدایش بر روی سطح منحنی..... ۵
- شکل (۱-۳) - آرایش استوانه های دایروی..... ۱۸
- شکل (۲-۳) - مش بندی حوزه حل برای دو استوانه دایروی..... ۱۹
- شکل (۳-۳) - هندسه استوانه بادامکی..... ۲۱
- شکل (۴-۳) - حوزه حل برای جریان آشفته حول دو استوانه بادامکی..... ۲۱
- شکل (۵-۳) - تغییرات ضریب درگ با توجه به تعداد مش های مختلف..... ۲۳
- شکل (۶-۳) - تغییرات ناسلت با توجه به تعداد مش های مختلف..... ۲۳
- شکل (۷-۳) - تقسیم نواحی برای مش بندی در نرم افزار گمبیت..... ۲۳
- شکل (۸-۳) - مش بندی حوزه حل دو استوانه بادامکی..... ۲۴
- شکل (۹-۳) - مش بندی حوزه حل از نمای نزدیک تر..... ۲۴
- شکل (۱۰-۳) - نمایی کلی از الگوریتم حل مسئله..... ۲۶
- شکل (۱۱-۳) - شرایط مرزی حوزه حل..... ۲۷
- شکل (۱۲-۳) - نمودار ضریب لیفت استوانه های بادامکی برای رینولدز ۵۵۰۰۰..... ۳۳
- شکل (۱-۴) - تاثیر عدد رینولدز بر ضریب درگ در رینولدزهای مختلف..... ۳۵
- شکل (۲-۴) - تاثیر افزایش فاصله بین دو استوانه دایروی بر ضریب درگ..... ۳۶
- شکل (۳-۴) - تاثیر عدد رینولدز بر عدد ناسلت برای دو استوانه دایروی..... ۳۷

- شکل (۴-۴) - تغییرات ضریب درگ با فاصله بین استوانه های بادامکی..... ۴۰
- شکل (۵-۴) - تغییرات ضریب لیفت با فاصله بین استوانه های بادامکی..... ۴۱
- شکل (۶-۴) - توزیع فشار بر روی استوانه های دایروی شکل..... ۴۳
- شکل (۷-۴) - توزیع فشار بر روی استوانه های بادامکی شکل..... ۴۴
- شکل (۸-۴) - تغییرات ضریب درگ محلی استوانه های بادامکی..... ۴۶
- شکل (۹-۴) - توزیع عدد ناسلت محلی بر روی محیط استوانه بادامکی..... ۴۸
- شکل (۱۰-۴) - تغییرات عدد ناسلت متوسط..... ۵۰
- شکل (۱۱-۴) - کانتورهای فشار و سرعت حول دو استوانه بادامکی..... ۵۱
- شکل (۱۲-۴) - کانتور دما حول دو استوانه بادامکی..... ۵۴
- شکل (۱۳-۴) - کانتورهای سرعت حول دو استوانه بادامکی..... ۵۷
- شکل (۱۴-۴) - تغییرات عملکرد هیدرولیکی - حرارتی برای استوانه های بادامکی..... ۵۸
- شکل (۱۵-۴) - مقایسه عملکرد هیدرولیکی - حرارتی استوانه های بادامکی با استوانه های دایروی..... ۶۰
- شکل (۱۶-۴) - تغییرات ضریب درگ با فاصله بین استوانه ها در فواصل مختلف دیواره ها..... ۶۲
- شکل (۱۷-۴) - تغییرات عدد ناسلت با فواصل مختلف دیواره ها..... ۶۳
- شکل (۱۸-۴) - عملکرد هیدرولیکی - حرارتی استوانه های بادامکی با فواصل مختلف دیواره ها..... ۶۵

# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- جریان آشفته

در زندگی روزمره و در طبیعت اطراف ما، موقعیت های زیادی برای مشاهده جریان های آشفته وجود دارد. دود خروجی از یک دودکش، جریان آب در یک رودخانه، آب خروجی از یک شیرکاملاً باز حمام، جریان هوا در لایه های مختلف جو زمین که باعث حرکت ابرها، تغییرات جوی و آب و هوایی، طوفان های شدید و انتقال آلودگی و گرد و غبار بین شهری و گاهی بین قاره ای می شود نمونه هایی از جریان آشفته هستند.

جریان های آشفته، پیچیده ترین و از طرفی متداولترین فرم حرکت سیالات می باشد. تقریباً تمامی جریان های سیال آشفته هستند. جریان پیرامون اتومبیل، هواپیما، ساختمان، قطار، کشتی و زیر دریایی، همچنین لایه مرزی و جریان های جدا شده اطراف بدنه ها و جریان سیال و عمل احتراق در موتورها، چه موتور های پیستونی و چه توربین گاز، همه و همه از نوع جریان های آشفته هستند.

در کاربرد های مهندسی، جریان های آشفته بسیار متداول می باشند. جریان سیالات در پمپ ها، کمپرسورها و خطوط انتقال سیال، عموماً آشفته هستند. اختلاط سوخت و هوا در موتورها و همچنین ترکیب واکنش دهنده ها در واکنش های شیمیایی همگی در جریان های آشفته رخ می دهند. ویژگی های جریان آشفته باعث شده تا پژوهشگران به آن به عنوان یک پدیده سحرآمیز بنگرند و مهندسان آن را گاهی دشمن و گاهی دوست بنامند چرا که وجود این پدیده در مواردی مفید و در مواردی مضر است. هنگام مشاهده یک آبشار ویژگی هایی از جریان آب که قابل مشاهده است به صورت جریان ناپایا، نامنظم، دارای حرکات اتفاقی، موج و مغشوش است و به همین دلیل پیش بینی حرکت یک قطره آب، غیر ممکن خواهد بود. گذشته از مکانیزم شکل گیری لایه مرزی، گرادیان های سرعت و عملکرد لزجت در آن، نحوه حرکت سیال درون آن به سه بخش جریان آرام، گذرا و آشفته قابل تقسیم می باشد.

در لایه مرزی شامل جریان آرام، حرکت جریان در بستر لایه هایی صورت می گیرد و طی آن هر لایه بر روی لایه مجاور خود می لغزد. مولکول های نزدیک دیواره کندترین مولکولها بوده و نزدیکترین

دما به دمای دیواره را خواهند داشت. در جریان لایه مرزی آرام انتقال جرم و مومنت تنها بین لایه های مجاور و به کمک مولکولهای سیال صورت می پذیرد. در این بین تنش برشی ناشی از لغزش لایه های مجاور سیال بر روی هم و همچنین بر روی دیواره، تنها از طریق ضریب لزجت تعیین خواهد شد. از آنجا که اکثر قریب به اتفاق جریان های آرام در عدد رینولدز پایین رخ می دهند باافزایش این عدد جریان ساختار جدیدی می یابد که به نام آشفته (متلاطم) شناخته می شود.

در این نوع جریان، حرکت لایه ای سیال از بین رفته و با پدیده اختلاط بین لایه ها مواجه می شویم. برخلاف جریان لایه ای، اختلاط در این جریان با چشم قابل مشاهده است. علاوه بر لزجت مولکولی که در جریان آرام تنها مکانیزم انتقال شناخته می شد، حرکت دورانی توده های به هم چسبیده سیال یا همان گردابه ها نیز در انتقال کمیت هایی چون جرم، انرژی و مومنت نقش دارند. لزجت حاصل از چنین جریانی به لزجت گردابه ای معروف است که برای محاسبه آن مدل های ریاضی بیشماری ابداع شده است. اما تغییر فاز جریان از آرام به آشفته به صورت ناگهانی رخ نمی دهد بلکه در این بین ابتدا وارد فاز گذار شده و پس از عبور از این فاز که بسته به شرایط می تواند دارای طول و زمان دلخواهی باشد، آشفته می گردد. تحلیل و شبیه سازی فاز گذار از پیچیده ترین بخش های مطالعاتی پدیده آشفتگی می باشد که هنوز با چالش های زیادی روبرو است.

در بسیاری از مسائل که در آن ها انتقال و اختلاط از اهمیت بسیاری برخوردار است استفاده از جریان آشفته اجتناب ناپذیر است. برای این امر، یکی از مهمترین ویژگی ها، اختلاط با سرعت و شدت بیشتر می باشد.

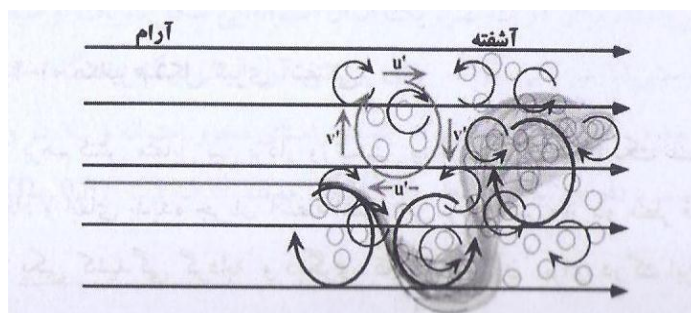
اگر چه تاکنون تعریف دقیقی از جریان آشفته ارائه نشده است اما از نقطه نظر تاریخی جالب است بدانیم که در سال ۱۹۳۷ تیلور و ون کارمن<sup>۱</sup> تعریف زیر را از پدیده آشفتگی ارائه دادند:

جریان آشفته یک نوع حرکت بی قاعده است که در مایعات و گازها هنگام عبور از روی سطوح صلب یا هنگام عبور دو جریان با سرعت های متفاوت از کنار هم رخ می دهد.

---

۱-Talor & von karman

جریان های آشفته اساساً دارای خاصیت ذاتی بی نظمی و بی قاعدگی، اتفاقی و مغشوش می باشد. در این جریان ها هیچ نظمی برای تغییرات خواص میدان جریان مانند سرعت، فشار و ..... وجود ندارد. این نوع از جریان ها از طیف های مختلفی از مقیاس های طولی که همان اندازه گردابه ها است تشکیل شده اند. اندازه بزرگترین ادی ها از مقیاس هندسه جریان مثلاً ضخامت لایه مرزی یا عرض جریان جت می باشد. در مقیاس های کوچک، گردابه هایی مشاهده می شوند که انرژی در آن ها توسط نیروهای ویسکوز تبدیل به انرژی درونی می شود. همان طور که گفته شد، در یک جریان آشفته، میدان سرعت و تحت اثر آن میدان فشار، دارای تغییرات اتفاقی است. در جریان های آشفته، اثر پخش افزایش می یابد. این بدین معنی است که نرخ گسترش و انتشار لایه مرزی، جت ها و.... با تبدیل جریان از آرام به آشفته بیشتر می شود. پدیده آشفتگی انتقال مومنت را افزایش داده و جدایش جریان را از بدنه مانند استوانه، ایرفویل و اتومبیل ها به تاخیر می اندازد. افزایش پخش پذیری همچنین باعث افزایش مقاومت اصطحاکاکی به خصوص در جریان های داخلی مثل جریان در کانال ها و لوله ها می شود. به این دلیل پخش پذیری خاصیت ذاتی جریان آشفته می باشد که اختلاط در جریان آشفته، مستقل از لزجت است، به جز در نواحی نزدیک دیواره جامد که تمام گردابه ها کوچک بوده و بیش از پدیده پخش آشفتگی تحت تاثیرات لزجت هستند. همان طور که در شکل (۱-۱) مشاهده می شود در جریان آرام به دلیل حرکت موازی لایه های سیال، اثر پخش امکان بروز جدی ندارد. اما در جریان آشفته، به دلیل وجود مولفه های سرعت اختلالی، این پدیده بسیار پر رنگتر بروز می کند.

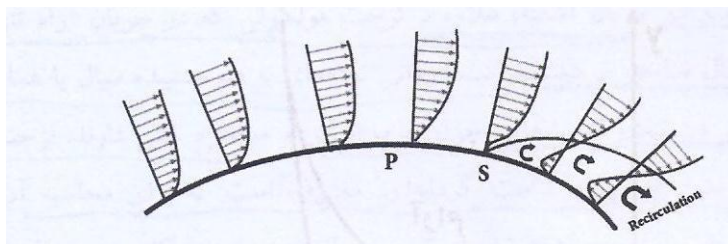


شکل ( ۱-۱) -مقایسه پدیده پخش رنگ در دو جریان آرام و آشفته

تعریف عدد رینولدز نسبت نیرو های اینرسی به نیروهای لزج است. لذا انتظار می رود تا با افزایش این عدد از سهم لزجت در جریان سیال کاسته شده و فرصت برای رشد اختلالاتی که به ایجاد جریان آشفته می انجامد فراهم یابد. جریان آشفته همیشه به دلیل توسعه این اختلالات در جریان آرام بوجود می آید. در نتیجه، جریان آشفته یک پدیده رینولدز بالا می باشد.

وجود گرادیان فشار یکی از عوامل موثر در ایجاد جریان در سیالات می باشد. به طور کلی این گرادیان را به دو دسته مطلوب و نامطلوب دسته بندی می کنند که این تقسیم بندی بر نحوه تعامل سیال و بدنه موثر می باشد. گرادیان فشار مطلوب (منفی) بیان می کند که با حرکت جریان به سمت پایین دست، از میزان فشار موضعی وارد بر آن کاسته خواهد شد و لذا به کمک نیروی رانشی که از پایین دست به سیال تزریق می شود ادامه حرکت آن امکان پذیر می شود.

اما در صورتی که در نقطه ای از سیال گرادیان فشار نامطلوب (مثبت) ایجاد شود، بدان معنی خواهد بود که با حرکت سیال به سوی پایین دست، بر میزان فشار آن افزوده می گردد و از آنجا که جهت حرکت در سیالات همیشه از سمت پر فشار به کم فشار است، این امر باعث ایجاد یک جریان برگشتی در پایین دست جریان شده و مقدمه ناپایداری و جدایش جریان از سطح را فراهم می کند. این رفتار در شکل (۲-۱) قابل مشاهده است.



شکل ( ۲-۱) -چگونگی شکل گیری گرادیان فشار معکوس و جدایش بر روی سطح منحنی



در این شکل، بدنه منحنی شکل برای ایجاد گرادیان فشار نا مطلوب انتخاب شده است. همانطور که ملاحظه می شود با حرکت سیال بر روی سطح، پروفیل لایه مرزی تشکیل شده و پیش می رود. جریان تا رسیدن به نقطه  $p$  که نقطه تغییر علامت شیب سطح می باشد به دلیل وجود گرادیان فشار مطلوب، حالت طبیعی خود را ادامه می دهد. اما پس از تغییر در شیب سطح که گرادیان فشار نامطلوبی ایجاد می کند شکل پروفیل سرعت در لایه مرزی به تدریج دستخوش تغییر شده تا در نقطه ای خاص مانند  $S$  به صورت نمایش داده شده در شکل خواهد شد.

این جدایش منجر به ایجاد جریانات چرخشی در پشت نقطه جدایش شده و علاوه بر کاستن از مقدار برآی بدنه به دلیل افت فشار، میزان پسای آن را نیز افزایش می دهد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در جریان حول جسم، عامل اصلی جدایش پس از لزجت، هندسه جسم می باشد.

## ۱-۲- اهمیت جریان و انتقال حرارت حول دو استوانه کنار هم

جریان حول اجسام بین دو صفحه موازی توسط بسیاری از محققین هم به صورت عددی و هم به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است و مقالات گوناگونی در این زمینه ارائه شده اند. این نوع از جریان ها به علت بهبود انتقال حرارت و همچنین به علت نگهداری از انرژی بسیار کاربردی است. مطالعه تاثیر آیرودینامیکی و بر همکنش جریان بین دو سیلندر کنار هم از لحاظ بنیادی و عملی اهمیت خاصی دارد.

آرایش دو لوله (جسم) در کنار هم، در صنعت دارای جایگاه ویژه ای می باشد و برای طراحی انواع سازه ها در بسیاری از کاربرد های مهندسی از جمله دسته لوله ها در مبدل های حرارتی، برج های خنک کننده، خط لوله نفت و گاز، خنک کننده های الکترونیکی، دودکش های بلند، پایه پلها و غیره استفاده می گردد. هندسه های استوانه ای اغلب در ساختارهای مهندسی ظاهر می شوند. اگرچه این ساختارها خیلی ساده اند، ولی شکل جریان اطراف آن ها ساده نیست. پیش بینی جریان های حلقوی جدا شده از روش تحلیلی تقریباً غیر ممکن است و از همین رو باید از طریق آزمایش یا شبیه سازی

عددی حل شوند. پیش بینی جریان حول استوانه ها سخت تر خواهد شد اگر دو یا بیشتر از این استوانه ها نزدیک به یکدیگر قرار گرفته باشند. جریان های حلقوی جدا شده بزرگ از هر یک از استوانه ها متقابلاً با یکدیگر اثر کرده و جریانی که به طور زیادی با جریان حول یک استوانه تک متفاوت است را بوجود می آورند. شکل دقیق برهم کنش جریان های حلقوی به عدد رینولدز جریان و محل قرارگیری استوانه ها بستگی دارد. عبور جریان سیال از جسمی که سطح نسبتاً بزرگی در مقابل جریان داشته باشد (از قبیل استوانه های مربعی، مستطیلی، دایره ای، بیضوی و...)، در ناحیه پشت آن یک ناحیه چرخشی ایجاد می کند که در اعداد رینولدز بالا با رخ دادن پدیده جدایش، ناحیه گردابه ای متقارن در پشت استوانه ایجاد شده که با افزایش عدد رینولدز، ابعاد آنها در امتداد جریان بزرگ و بزرگتر شده تا اینکه از حالت دائم خارج و بصورت یکی در میان از سطح پشتی استوانه جدا شده و در جریان پایین دست ریزش می یابد. به این پدیده ناپایدار، ریزش گردابه<sup>۱</sup> گویند. این پدیده موجب افزایش انتقال حرارت از استوانه ها می شود. پدیده ناپایدار- تناوبی ریزش گردابه موجب اعمال نیروهای نوسانی به استوانه ها خواهد شد که باعث ارتعاش سازه می شود. این ارتعاشات یکی از نگرانیهای اصلی در مورد سازه هایی است که در معرض جریان قرار دارند.

### ۱-۳- تاریخچه مطالعات و تحقیقات انجام شده

مطالعات انجام شده نشان می دهد که جریان اطراف دو جسم، به علت اثر متقابل آنها بر ویژگی های جریان، بر پیچیدگی های بررسی جریان اطراف یک جسم تنها خواهد افزود و در حال حاضر بر هم کنش جریان روی دو جسم کنار هم در حال تبدیل شدن به یک زمینه تحقیق عمومی است. در مطالعه حاضر ضریب درگ و انتقال حرارت در جریان آشفته از روی استوانه های بادامکی با آرایش کنارهم بررسی خواهد شد. علی رغم اینکه مطالعات کمی قبلاً در زمینه مطالعه جریان روی دو استوانه انجام شده بود، اما در اواسط دهه ۱۹۷۰ علاقه به مطالعه در این زمینه بیشتر شد و تا اکنون ادامه یافته است. اگر چه تعدادی شبیه سازی عددی اخیراً انجام شده است اما بیشتر مطالعات و تحقیقات روی استوانه های مربعی، دایروی و بیضوی اغلب تجربی بوده است.

---

۱-Vortex shedding

از کارهای انجام شده در این زمینه می توان به مطالعات زیر اشاره کرد.

در سال ۱۹۷۷ زدراوکوویچ<sup>۱</sup> و پریدن<sup>۲</sup> [۱] ضریب درگ روی دو استوانه مدور در آرایش کنار هم را در رینولدز ۵۵۰۰۰ مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که خصوصیت جریان به شدت با فاصله بین دو استوانه و عدد رینولدز در ارتباط می باشد. زوا<sup>۳</sup> و همکارانش [۲] در سال ۲۰۰۲ به کمک روش تجربی، جریان و انتقال حرارت حول دو استوانه دایروی کنار هم که فاصله بین استوانه ها تا سه برابر قطر آنها بود مورد بررسی قرار دادند. آنها مشخص کردند که قدرت و اندازه گردابه ها به فاصله بین دو استوانه بستگی داشته و در نسبت فاصله های بزرگتر دو خیابان گردابه غیر هم فاز تشکیل می شود. در سال ۲۰۰۳ الم<sup>۴</sup> و مورییا<sup>۵</sup> [۳] به بررسی جریان سیال بین دو استوانه دایروی با  $0.1 < T/D_{eq} < 5$  و  $Re = 5/5 \times 10^4$  پرداختند. آنها با توجه به فاصله بین دو استوانه دایروی و عدد رینولدز به سه رژیم مجزا برای جریان سیال دست یافتند.

اکسو<sup>۶</sup> و همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۳ به کمک روش تجربی، جریان و انتقال حرارت حول دو استوانه دایروی کنار هم را در فاصله بین استوانه ها تا  $1/6$  برابر قطر استوانه ها در محدوده رینولدز ۱۵۰ تا ۱۴۳۰۰ مورد بررسی قرار دادند. آنها ساختار جریان پشت سیلندرها را در نسبت فاصله های مختلف بررسی کردند. در سال ۲۰۰۶ دیو<sup>۷</sup> و کویان<sup>۸</sup> [۵] در یک مطالعه عددی ساختار جریان حول دو استوانه مثلثی کنار هم را در رینولدز ۴۷۰۰۰۰ و با نسبت فاصله  $0.12$  تا  $0.48$  مورد بررسی قرار دادند. آنها با تغییر فاصله بین دو استوانه مثلثی انواع رژیم های مجزا برای جریان را مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۰۹ مانای<sup>۹</sup> و گونس<sup>۱۰</sup> [۶] در یک مطالعه عددی انتقال حرارت حول دو استوانه

---

۱- Zdravkovich

۲- Pridden

۳- Zhou

۴- Alam

۵- Moriya

۶- Xu

۷- Du

۸- Qian

۹- Manay

۱۰- Gunes

مثلی کنار هم را در محدوده رینولدز ۱۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ مورد بررسی قرار دادند. بهترین عدد ناسلت آنها در رینولدز ۴۰۰۰۰ بدست آمد که برابر ۴۶۳ بود.

در سال ۲۰۱۰ تسوتسویی<sup>۱</sup> [۷] در یک مطالعه تجربی انتقال حرارت و جریان سیال بین دو استوانه دایروی را در محدوده رینولدز بین  $1/1 \times 10^4$  تا  $6/2 \times 10^4$  بررسی کردند. قطر سیلندرها ۴۰ میلیمتر و فاصله بین سیلندرها دایروی ۴ تا ۴۰ میلیمتر تغییر می‌کرد. محدوده سرعت جریان ورودی بین ۴ تا ۲۴ متر بر ثانیه تغییر می‌کرد که نشان می‌داد در نسبت فاصله ۰/۳ مقدار ضریب درگ و ناسلت دارای مینیمم مقدار می‌باشد.

در سال ۲۰۱۱ ایامسا<sup>۲</sup> و همکارانش [۸] ساختار جریان و انتقال حرارت حول دو استوانه مثلی کنار هم برای اعداد رینولدز ۱۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ را بررسی کردند. آنها دریافتند که نیروی درگ تا حد زیادی وابسته به عدد رینولدز و فاصله بین استوانه‌ها است. محبوب الم<sup>۳</sup> و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۱ به کمک روش‌های تجربی انواع جریان‌ها را حول دو استوانه مربعی در رینولدز ۴۷۰۰۰ مورد بررسی قرار دادند که چهار رژیم مجزا برای جریان متناظر با نسبت فاصله آنها برپایه ساختار جریان مشخص شد. در سال ۲۰۱۱ مقدم و همکارانش [۱۰] ساختار جریان و انتقال حرارت حول دو استوانه دایروی کنار هم برای رینولدز ۱۰۰۰۰ را بررسی کردند. آنها دریافتند که ضریب درگ و لیفت تا حد زیادی وابسته به فاصله بین استوانه‌ها است.

از بین اشکال مختلف برای مقاطع استوانه‌ها، مقطع دایره‌ای، مستطیلی و مربعی به صورت گسترده تری مورد بررسی قرار گرفته است. استوانه بادامکی یک جسم دماغه دار است که یک جریان حلقوی جدایش یافته بزرگ را شکل می‌دهد. روشن است که یک استوانه بادامکی به علت پروفیل خط جریانی خود درگ اصطکاکی کمتری نسبت به استوانه مدور دارد. با توجه به شکل هندسی بادامک و دوکی تر بودن آن نسبت به هندسه‌های دیگر انتظار عملکرد و بازده بهتری را از این هندسه جریانی می‌رود. بنابراین با توجه به پروفیل استوانه بادامکی این سطح مقطع مورد مطالعه قرار گرفته است.

---

۱- Tsutsui

۲- Eiamsa

۳- Mahbub alam