



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مکانیک

## بررسی عددی و تجربی برهمکنش سیال-جامد با در نظر گرفتن اثر سطح آزاد

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

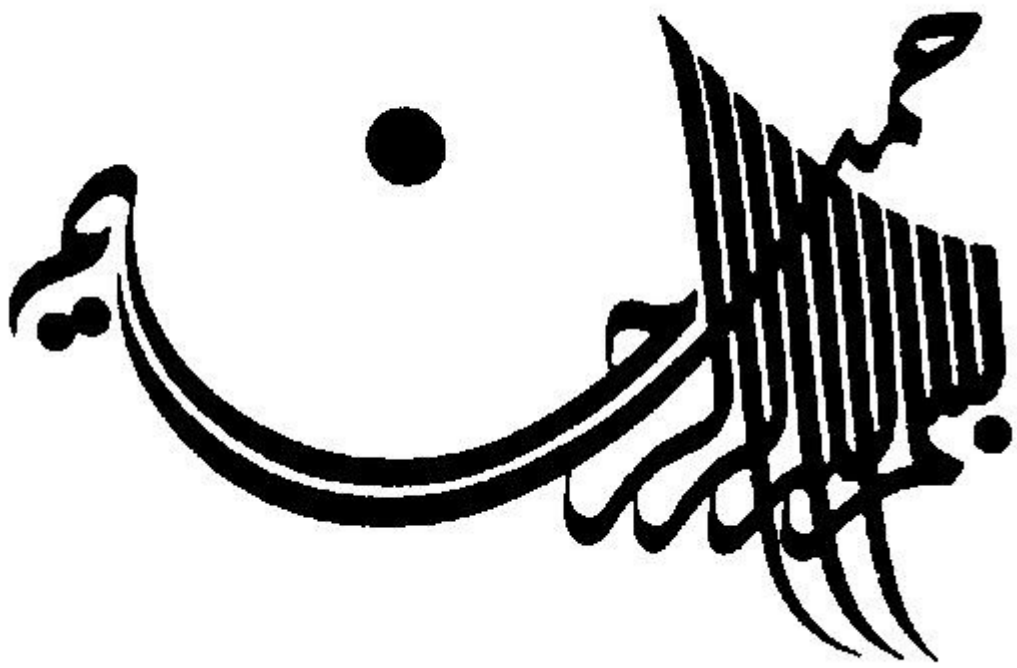
امید ناظم پور

اساتید راهنما

دکتر احمد رضا پیشه‌ور

دکتر شهریار منصورزاده







## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
چکیده	۱
<b>فصل اول: مقدمه</b>	
۱-۱ نوسانات القا شده توسط جریان سیال (FIV)	۳
۱-۱-۱ دسته‌بندی نوسانات القا شده توسط جریان سیال	۳
۲-۱ نوسانات القا شده توسط گردابه‌ها (VIV)	۶
۱-۲-۱ جاری شدن گردابه‌ها در پشت اجسام استوانه‌ای مدور ثابت	۶
۲-۲-۱ اثر حرکت و نوسان جسم بر دنباله ایجاد شده	۱۰
۳-۲-۱ جسم VIV، ویژگی‌های پدیده VIV	۱۲
۳-۱ نوسانات القا شده توسط جریان سیال بر یک جسم کروی	۱۳
۱-۳-۱ تاریخچه پژوهش‌های تجربی	۱۴
۲-۳-۱ تاریخچه پژوهش‌های عددی	۱۸
۴-۱ معرفی پژوهش حاضر	۲۴
<b>فصل دوم: تشریح مسئله، تئوری و معادلات حاکم</b>	
۱-۲ تئوری و تشریح مسئله در فاز تجربی	۲۶
۱-۱-۲ گروه‌های بدون بعد و پارامترهای موثر	۲۶
۲-۱-۲ فرآیند داده‌کاهی و تحلیل نتایج تجربی	۳۰
۲-۲ تئوری و تشریح مسئله در فاز عددی	۳۲
۱-۲-۲ روند گسسته‌سازی معادلات	۳۳
۲-۲-۲ دستگاه معادلات جبری همبسته	۳۵
۳-۲-۲ همگرایی معادلات	۳۸
۴-۲-۲ شبیه‌سازی جریان دوفازی	۳۸
۵-۲-۲ مدل‌سازی اغتشاشات جریان	۴۰
۶-۲-۲ مدل‌سازی جریان در نزدیکی دیواره	۴۳
۷-۲-۲ مدل‌سازی شناوری جریان	۴۴
۸-۲-۲ شبیه‌سازی برهمکنش سیال-جامد (FSI)	۴۵
<b>فصل سوم: نتایج تجربی</b>	
۱-۳ مشخصات مدل مورد آزمایش	۴۹
۲-۳ تجهیزات اندازه‌گیری و کالیبراسیون آنها	۵۱
۱-۲-۳ معرفی تجهیزات اندازه‌گیری	۵۱
۲-۲-۳ کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری	۵۳
۳-۲-۳ خطاهای آزمایش	۵۴

۵۴	.....	۳-۳	روند انجام آزمایش‌های تجربی
۵۴	.....	۱-۳-۳	تست میله استوانه‌ای
۵۵	.....	۲-۳-۳	تست کره با میله الاستیک
۵۷	.....	۳-۳-۳	تست کره با میله صلب
۵۸	.....	۴-۳	نتایج تجربی کره و میله الاستیک
۵۸	.....	۱-۴-۳	نتایج کره و میله الاستیک با نسبت طولی ۲.۲۵
۶۱	.....	۲-۴-۳	نتایج کره و میله الاستیک با نسبت طولی ۲.۰۵
۶۳	.....	۳-۴-۳	نتایج کره و میله الاستیک با نسبت طولی ۱.۹
۶۵	.....	۴-۴-۳	مقایسه نتایج برای نسبت‌های طولی مختلف
۶۸	.....	۵-۳	نتایج تجربی کره و میله صلب

#### فصل چهارم: نتایج شبیه‌سازی عددی

۷۱	.....	۱-۴	تحلیل جریان مغشوش پیرامون کره با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)
۷۲	.....	۱-۱-۴	هندسه مدل و شبکه بندی میدان حل
۷۴	.....	۲-۱-۴	شرایط اولیه و گام زمانی حل
۷۴	.....	۳-۱-۴	شرایط مرزی
۷۶	.....	۴-۱-۴	نتایج شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ
۸۰	.....	۲-۴	شبیه‌سازی برهمکنش سیال-جامد کره و میله الاستیک
۸۱	.....	۱-۲-۴	تشریح مراحل آماده‌سازی و روند مدل‌سازی
۸۵	.....	۱-۲-۴	نتایج شبیه‌سازی برهمکنش سیال-جامد کره و میله الاستیک برای نسبت طولی ۲.۰۵
۹۳	.....	۲-۲-۴	نتایج شبیه‌سازی برهمکنش سیال-جامد کره و میله الاستیک برای نسبت طولی ۲.۲۵
۹۷	.....	۳-۲-۴	مقایسه نتایج شبیه‌سازی برهمکنش سیال-جامد کره و میله برای دو نسبت طولی ۲.۰۵ و ۲.۲۵
۹۹	.....	۴-۲-۴	مقایسه نتایج آزمایش‌های تجربی با شبیه‌سازی برهمکنش سیال-جامد
۱۰۳	.....	۵-۲-۴	مقایسه ساختار دنباله کره در دو حالت کره بدون نوسان و کره با حرکت ارتعاشی

#### فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۰۵	.....	۳-۴	خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده
۱۰۶	.....	۴-۴	پیشنهادات
۱۰۷	.....		مراجع

## فهرست نشانه‌ها

جرم کره	$m$
چگالی آب	$\rho$
قطر کره	$D$
فاصله سطح بالای کره از سطح آزاد	$h$
سرعت جریان آزاد (X)	$U$
طول میله	$L$
سطح مقطع میله	$A$
فرکانس نوسانات نیرو در جهت X	$f_x$
فرکانس نوسانات نیرو در جهت Y	$f_y$
فرکانس جابجایی مرکز کره در راستای X	$f_{Dx}$
فرکانس جابجایی مرکز کره در راستای Y	$f_{Dy}$
فرکانس طبیعی کره و میله	$f_N$
فرکانس جاری شدن گردابه <sup>1</sup> در حالت عدم نوسان کره	$f_{vo}$
مدول یانگ میله	$E$
لزجت سیال	$\mu$
شتاب گرانش	$g$
جرم افزوده <sup>2</sup>	$m_a$
ضریب جرم افزوده پتانسیل <sup>3</sup>	$C_A$
ضریب فاصله از سطح آزاد	$\alpha$
نسبت جرمی <sup>4</sup>	$m^*$
نسبت غرق شدگی کره <sup>5</sup>	$h^*$

---

<sup>1</sup> Vortex Shedding

<sup>2</sup> Added mass

<sup>3</sup> Potential Added mass ratio

<sup>4</sup> Mass ratio

<sup>5</sup> Relative submergence

عدد رینولدز	Re
عدد استروهاال	St
عدد فرود	Fr
نسبت طول میله به قطر کره	$l^*$
ضریب نیرو در راستای جریان (X) (درگ)	$C_x$
ضریب نیرو در راستای عرضی جریان (Y)	$C_y$
جابجایی مرکز کره در راستای جریان (X)	$D_x$
جابجایی مرکز کره در راستای عرضی جریان (Y)	$D_y$
سرعت کاسته <sup>6</sup>	$U^*$
نسبت فرکانس نیرو در جهت جریان (X)	$f_x^*$
نسبت فرکانس نیرو در جهت عرضی جریان (Y)	$f_y^*$
نسبت الاستیسیته میله	$E^*$
متوسط نیروی وارده در راستای جریان	$F_{X,ms}$
متوسط نیروی وارده در راستای عرضی جریان	$F_{Y,ms}$
دامنه جابجایی مرکز کره	A

---

<sup>6</sup> Reduced velocity ( or Normalized velocity)



## چکیده

برای بسیاری از اجسامی که در مقابل جریان سیال قرار می‌گیرند، امکان ایجاد نوساناتی که به وسیله جریان سیال القا می‌شود، وجود دارد. این پدیده مرتبط با جریان سیال، با نام ارتعاشات القا شده توسط جریان سیال نامیده می‌شود. هدف پژوهش حاضر بررسی نوسانات القا شده توسط جریان سیال به یک جسم کروی می‌باشد. مطالعات تجربی پژوهش حاضر در حوضچه کشش پژوهشگاه زیردریای دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است. برای شبیه‌سازی عددی از نرم افزار ANSYS CFX استفاده شده است. جسم کروی مورد پژوهش به وسیله یک میله الاستیک مهار شده است و قابلیت ارتعاش در راستای جریان و راستای عرضی جریان را دارد. اثر تغییر طول میله و همچنین تغییر فاصله از سطح آزاد بر حرکت ارتعاشی کره در محدوده رینولدز  $10^5 \leq Re \leq 2.8 \times 10^5$  مورد بررسی قرار گرفته است. در این محدوده رینولدز، دنباله کره کاملاً مغشوش است. برای بررسی اثر تغییر طول میله از سه میله هم جنس با طول‌های متفاوت استفاده شد. با تغییر طول میله، فرکانس طبیعی سیستم تغییر می‌کند و حرکت ارتعاشی کره تغییر می‌کند. با نزدیک شدن فرکانس نیروهای وارده به فرکانس طبیعی کره و میله، پدیده رزونانس یا Lock-in اتفاق می‌افتد که باعث افزایش دامنه ارتعاشات کره و کاهش شدید نیروهای وارد بر کره می‌شود.

کلمات کلیدی: ۱- نوسانات القا شده توسط جریان سیال ۲- برهمکنش سیال-جامد ۳- جریان مغشوش ۴-

رزونانس

## فصل اول

### مقدمه

برای بسیاری از اجسامی که در برابر جریان سیال قرار می‌گیرند، امکان ایجاد نوسانات و ارتعاشاتی که به وسیله جریان سیال القا می‌شود، وجود دارد. این پدیده مرتبط با جریان سیال، با نام کلی ارتعاشات القا شده بوسیله جریان سیال<sup>1</sup> شناخته می‌شود. این پدیده در بسیاری از زمینه‌های فنی و مهندسی رخ می‌دهد، به عنوان مثال می‌توان به طراحی سازه‌هایی نظیر پل‌ها، دودکش‌ها، خطوط انتقال برق (کابل‌های جریان برق)، بال‌های هواپیما، سازه‌های فراساحلی، رایزرهای استخراج نفت در سکوها، نفتی، مبدل‌های حرارتی، خطوط لوله، کابل‌های دریایی، اجزاء و بالک‌های زیردریایی اشاره نمود. این قبیل ارتعاشات در صورت کنترل نشدن می‌تواند سبب آسیب رساندن و خرابی سازه‌ها گردد. یکی از دلایل اصلی بروز ارتعاشات در اجسامی که در برابر جریان سیال قرار می‌گیرند جدایش جریان و شکل‌گیری ساختارهای گردابه‌ای<sup>2</sup> در دنباله<sup>3</sup> جسم می‌باشد. این ساختارهای گردابه‌ای با اعمال نیروهای نوسانی به جسم، باعث ارتعاش جسم آن می‌شوند. به گروهی از ارتعاشات القا شده توسط جریان سیال که عامل اصلی ایجاد آنها ساختارهای گردابه‌ای ایجاد شده در دنباله جسم می‌باشد ارتعاشات القا شده توسط گردابه‌ها<sup>4</sup> گفته می‌شود.

---

<sup>1</sup> Flow induced vibration (FIV)

<sup>2</sup> Vortex

<sup>3</sup> Wake

<sup>4</sup> Vortex induced vibration (VIV)

## ۱-۱ نوسانات القا شده توسط جریان سیال (FIV)

ارتعاشات بوجود آمده به وسیله جریان سیال، در بسیاری از تجهیزات صنعتی رخ می‌دهد و مانع عملکرد روان و هموار آنها می‌شود. این پدیده مرتبط با جریان سیال، با نام ارتعاشات القا شده بوسیله جریان سیال شناخته می‌شود. در مورد لوله‌ای که به یک ماشین سیالی رفت و برگشتی متصل است، نوسان جریان در لوله، نیروهای تحریک کننده‌ای را تولید می‌کند که باعث ارتعاش لوله می‌شود. در شرایط جریان پایا نیز وجود ارتعاشات، ممکن است به علت جاری شدن گردابه<sup>۱</sup> در پشت جسم، باشد. این نوع از ارتعاشات القا شده، که اغلب در جریان پایا نیز رخ می‌دهد، بسیار پیچیده بوده و تعیین مکانیزم حاکم بر آن مشکل بوده و باید در طراحی‌ها و رفع نقص‌ها مورد توجه قرار گیرد.

اولین کنفرانس درباره ارتعاشات مرتبط با جریان سیال، در سال ۱۹۷۲ به ابتکار ناوداچر<sup>۲</sup> در آلمان برگزار شد. در این کنفرانس، بسیاری از مسائل عملی مرتبط با ارتعاشات القا شده بوسیله جریان سیال، در زمینه‌های گوناگون صنعتی، مانند سیستم‌های مکانیکی، مهندسی عمران، هواپیما سازی، کشتی سازی و نیروگاه‌های هسته‌ای ارائه شد. در سال ۱۹۷۷ بلوین<sup>۳</sup> اولین کتاب را در این زمینه منتشر نمود، اصطلاح "نوسانات القا شده توسط جریان سیال" پس از کاربرد در عنوان کتاب، توسط وی رواج یافت. در این کتاب برای اولین بار پدیده FIV بر اساس دو نوع اصلی جریان دسته بندی گردید؛ ارتعاشات القا شده توسط جریان پایا و ارتعاشات القا شده توسط جریان ناپایا.

### ۱-۱-۱ دسته‌بندی نوسانات القا شده توسط جریان سیال

با توجه به پیچیدگی پدیده‌هایی که بر اثر نوسانات القا شده توسط جریان سیال بوجود می‌آیند، روش‌های متفاوتی برای دسته‌بندی آنها پیشنهاد شده است. در اینجا یکی از این روش‌ها که توسط ناوداچر پیشنهاد شده و در اغلب منابع بکار رفته است ارائه می‌گردد.

در روشی که توسط ناوداچر پیشنهاد شده است، نوسانات القا شده توسط جریان سیال بر اساس منابع تحریک این نوسانات، دسته‌بندی شده‌اند. مطابق این روش، نوسانات القا شده توسط جریان سیال، به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱. تحریک القا شده توسط عامل خارجی<sup>۴</sup>: تحریک القا شده توسط عامل خارجی بدلیل وجود نوساناتی در جریان یا فشار، مستقل از هر گونه ناپایداری جریان و هرگونه حرکت جسم بوجود می‌آید. به عنوان مثال می‌توان به نوسانات موجود در جریان آزاد بالادستی بدلیل اغتشاش<sup>۵</sup> آن اشاره نمود.

<sup>۱</sup> Vortex shedding

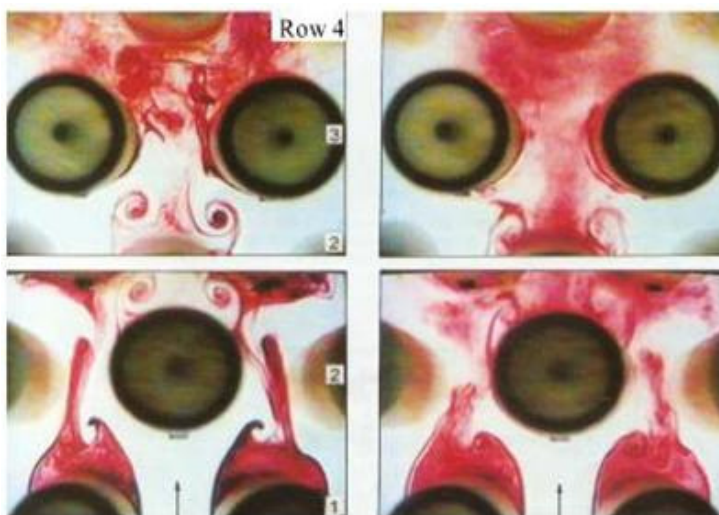
<sup>۲</sup> Naudascher

<sup>۳</sup> Blevin

<sup>۴</sup> Externally induced excitation (EIE)

<sup>۵</sup> Turbulence

۲. تحریک القا شده توسط ناپایداری<sup>۱</sup>: این نوع تحریکات توسط ناپایداری جریان و نوسانات موضعی جریان بوجود می‌آید. مانند جریان عبوری از روی دسته‌ای از استوانه‌ها، در این نوع نوسانات، دنباله<sup>۲</sup> ایجاد شده از استوانه‌هایی که در ردیف نخست قرار دارند باعث ناپایدار شدن جریان شده و ساختار جریان برای لوله‌هایی که در ردیف بعدی قرار دارند، تغییر می‌کند. به عنوان مثالی دیگر می‌توان به جاری شدن متناوب گردابه از یک سازه استوانه‌ای ثابت اشاره نمود. در شکل ۱-۱ ناپایدار شدن جریان عبوری از روی دسته‌ای از لوله را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱-۱- ناپایدار شدن جریان عبوری از روی دسته‌ای از لوله و تاثیر بر دنباله استوانه ردیف بعدی

۳. تحریک القا شده توسط حرکت جسم<sup>۳</sup>: در این نوع از تحریک، نیروی نوسانی از حرکت جسم ناشی می‌شود، بعبارت دیگر ارتعاشات بصورت خودتحریک<sup>۴</sup> می‌باشد. فلاتر<sup>۵</sup> بال هواپیما از جمله این گونه نوسانات می‌باشد. چیزی که تحریک القا شده توسط حرکت جسم را از انواع دیگر متمایز می‌کند، این است که در غیاب حرکت جسم، هیچ گونه تحریک نوسانی وجود نخواهد داشت [۱].

سایر دسته بندی‌های ارائه شده، اغلب بر اساس پدیدارشناسی نوسانات القا شده توسط جریان سیال می‌باشند. از دیگر دسته بندی‌های مهم موجود، می‌توان به دسته بندی ارائه شده توسط کانکو<sup>۶</sup> (۲۰۰۸) اشاره نمود. در این دسته‌بندی، نوسانات القا شده توسط جریان سیال به سه دسته کلی جریان پایا، جریان ناپایا و جریان دوفازی تقسیم

<sup>1</sup> Instability- induced excitation (IIE)

<sup>2</sup> Wake

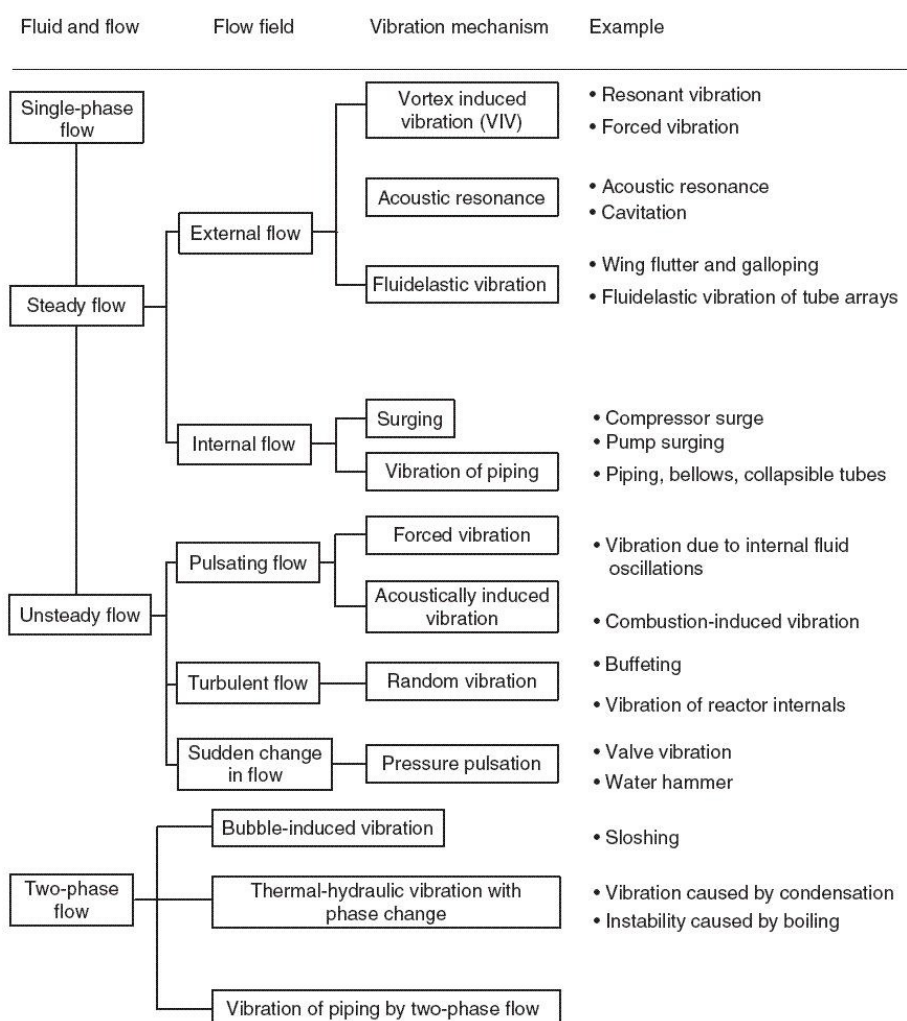
<sup>3</sup> Movement induced excitation (MIE)

<sup>4</sup> Self-excited

<sup>5</sup> Flutter

<sup>6</sup> Kaneko

شده اند [۲]. لازم به ذکر است همواره تمایلی وجود دارد که علت نوسانات القا شده توسط جریان سیال را مشارکت جاری شدن گردابه‌ها دانست. اما همواره باید به این نکته توجه داشت که جاری شدن گردابه‌ها فقط یکی از چندین مکانیزمی است که ممکن است مسئول بوجود آمدن ارتعاشات در جسم جامد باشد. در شکل ۱-۲ نمونه‌ای از دسته بندی دیگری که توسط شیگه‌ایکو<sup>۱</sup> پیشنهاد شده است، نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- دسته‌بندی نوسانات القا شده توسط جریان سیال [۲].

<sup>1</sup> Shigehiko

## ۲-۱ نوسانات القا شده توسط گردابه‌ها (VIV)

گردابه بصورت حرکت تعداد بسیار زیادی از ذرات سیال پیرامون یک نقطه مشترک تعریف می‌شود. بطور کلی جاری شدن گردابه‌ها در جریان‌های زیر صوتی<sup>۱</sup> اتفاق می‌افتد. دنباله‌های ایجاد شده از گردابه‌ها، صرف نظر از هندسه اجسام، بسیار شبیه هم می‌باشد [۳]. لذا در این قسمت برای معرفی پدیده نوسانات القا شده توسط جریان سیال، دنباله ایجاد شده و جاری شدن گردابه‌ها در پشت اجسام استوانه‌ای مدور، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۱-۲-۱ جاری شدن گردابه‌ها در پشت اجسام استوانه‌ای مدور ثابت

در قرن پانزدهم، لئوناردو داوینچی ردیف‌هایی از گردابه‌های موجود در دنباله ستونی که در معرض جریان آب قرار گرفته بود، رسم نمود. او شاید اولین دانشمندی بود که وجود این ساختارها را در پشت اجسام بررسی نمود. در سال ۱۸۷۸ استروهل کشف کرد صدایی که توسط سیمی که در معرض باد قرار دارد تولید می‌شود (نوی آئولین<sup>۲</sup>)، متناسب با سرعت باد تقسیم بر ضخامت سیم، می‌باشد. متناوب بودن دنباله ایجاد شده در پشت استوانه که بدلیل جاری شدن گردابه‌ها می‌باشد در سال ۱۹۰۸ کشف شد و پس از آن فون کارمن شکل‌گیری مسیری پایدار از گردابه‌ها در پشت استوانه را در سال ۱۹۱۲ نشان داد. هنگامی که انرژی جنبشی ذرات سیال در لایه مرزی، برای غلبه بر میدان فشار پایین دست استوانه کافی نباشد، جریان از سطح جسم جدا خواهد شد. نقطه‌ای که جریان در آن دچار جدایش از سطح می‌شود نقطه جدایش<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. در بالادست نقطه جدایش ناحیه لایه مرزی وجود دارد و در پایین دست این نقطه، ناحیه دنباله ایجاد می‌گردد. ادامه لایه مرزی در پایین دست نقطه جدایش، لایه برشی<sup>۴</sup> نامیده می‌شود.

بطور کلی نقطه جدایی بر روی یک جسم، علاوه بر گرادیان فشار به عوامل دیگری چون نوع ناپایداری موجود در جریان اطراف، اغتشاش<sup>۵</sup> موجود در بالادست نقطه جدایش، ناهموازی‌های سطح جسم و مد جاری شدن گردابه‌ها، بستگی دارد. جدایش لایه مرزی اغلب باعث افزایش چشمگیر نیروی درگ وارد بر جسم می‌شود. به عنوان مثال در جریان پیرامون استوانه، هنگامی که لایه مرزی از سطح استوانه جدا می‌شود، مقدار فشار ایجاد شده بر روی استوانه در پایین دست نقطه جدایی بسیار کمتر از مقدار فشار در جلوی استوانه (نقطه سکون) و تقریباً برابر مقادیر فشار در نقاط بالایی و پایینی استوانه می‌باشد. این اختلاف زیاد بین فشار ایجاد شده در جلوی استوانه و فشار پشت استوانه سبب ایجاد درگ فشاری می‌گردد.

<sup>1</sup> Subsonic

<sup>2</sup> Aeolian tone

<sup>3</sup> Separation point

<sup>4</sup> Shear layer

<sup>5</sup> Turbulence

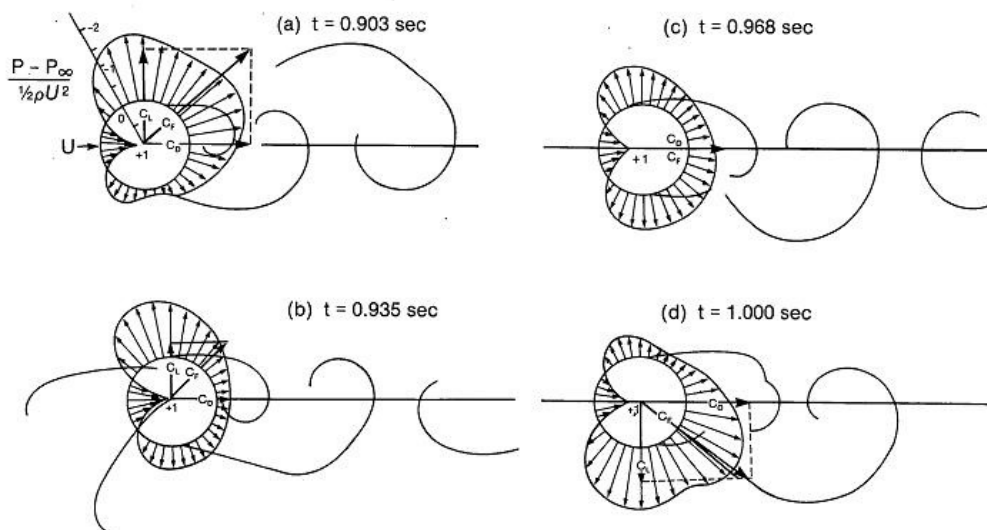
در نزدیکی عریض ترین قسمت مقطع استوانه، لایه مرزی از هر دو سمت بالا و پایین استوانه شروع به جدا شدن از سطح استوانه می کند و دو لایه برشی شکل می گیرد و در پشت استوانه حرکت کرده و دنباله استوانه را ایجاد می کند. از آنجائیکه داخلی ترین قسمت لایه برشی که با استوانه در تماس است، بسیار آهسته تر از قسمت خارجی لایه برشی که با جریان آزاد در تماس است، حرکت می کند، لایه های برشی به سمت داخل دنباله می غلتند و در آنجا باهم می آمیزند و گردابه های چرخان مجزایی را تولید می کنند [۴]. در نهایت، الگوی منظمی از گردابه ها در پشت استوانه ایجاد می شود که گردابه راه<sup>۱</sup> (مسیر گردابه) نامیده می شود. شکل گیری این مسیر گردابه ها اولین بار در سال ۱۹۱۲ توسط فون کارمن مشاهده شد. (شکل ۱-۳)



شکل ۱-۳- مسیر گردابه های فون کارمن در پشت استوانه [۵].

جاری شدن گردابه ها بصورت متناوب از بالا و پایین استوانه صورت می گیرد و لذا توزیع فشار ایجاد شده بر روی استوانه نیز تغییر می کند. این تغییر باعث ایجاد یک نیروی نوسانی می شود که سبب ارتعاش استوانه می شود. میدان فشار ایجاد شده بر روی سطح استوانه و شکل گیری گردابه ها در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Vortex street



شکل ۱-۴- ترتیبی از میدان فشار سطح و ضرایب نیرو و شکل‌گیری دنباله استوانه درینولدز ۱۱۲۰۰۰ [۶]

### رژیم‌های جریان

جاری شدن گردابه‌ها از یک سطح صاف استوانه‌ای مدور، در جریان پایای زیرصوتی تابعی از عدد رینولدز است [۳]. عدد رینولدز بصورت نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزجی تعریف می‌شود. اگر سرعت جریان آزاد را با  $U$ ، قطر جسم را با  $D$  و لزجت سینماتیک سیال با  $\nu$  نشان داده شود، عدد رینولدز بصورت زیر می‌باشد:

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad 1-1$$

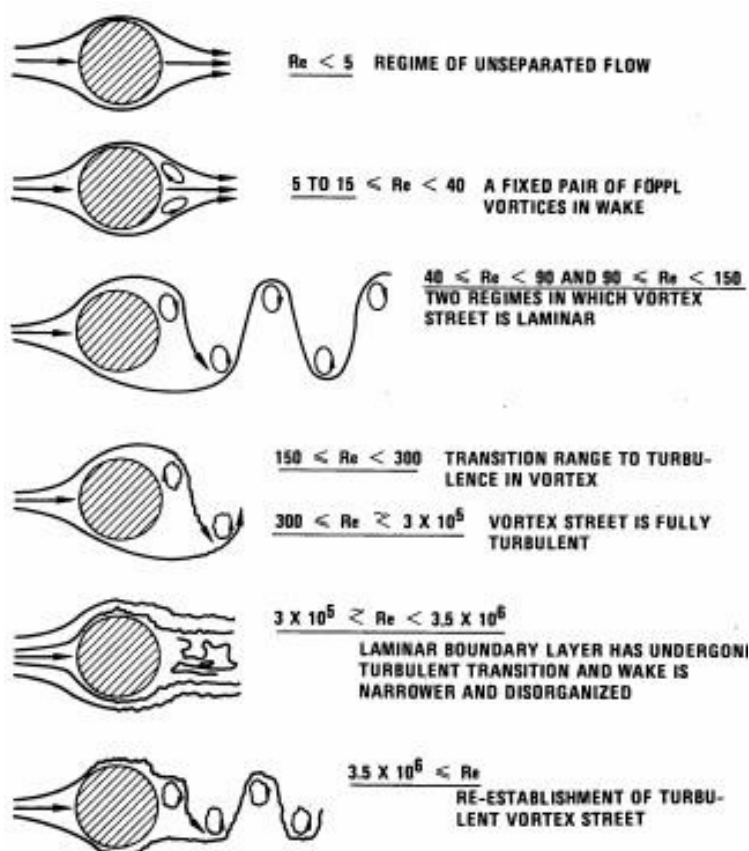
در اعداد رینولدز کمتر از ۵ هیچ‌گونه جدایشی از جریان روی سطح استوانه مشاهده نمی‌شود و خطوط جریان مشابه خطوط جریان پتانسیل می‌باشد. در محدوده  $5 \leq Re \leq 45$  جدایش جریان از پشت استوانه آغاز می‌شود و یک زوج متقارن از گردابه‌ها در نزدیکی دنباله استوانه تشکیل می‌شود. طول در راستای جریان گردابه‌ها، با افزایش عدد رینولدز بصورت خطی افزایش می‌یابد و در رینولدز ۴۵ به سه برابر قطر استوانه می‌رسد [۷]. با افزایش بیشتر عدد رینولدز، دنباله ایجاد شده ناپایدار می‌شود و یکی از گردابه‌ها گسیخته می‌شود. در محدوده  $45 \leq Re \leq 90$  دنباله‌ای متناوب و آرام از گردابه‌های شطرنجی<sup>۱</sup> با علامت مخالف، شکل می‌گیرد. در محدوده  $150 \leq Re \leq 300$  دنباله ایجاد شده از گردابه‌ها مغشوش می‌شود اما لایه مرزی روی استوانه همچنان آرام باقی می‌ماند [۸].

محدوده  $300 \leq Re \leq 1.5 \times 10^5$  محدوده زیربحرانی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. در این محدوده لایه مرزی آرام روی استوانه در زاویه حدود ۸۰ درجه از سطح جدا می‌شود و جاری شدن گردابه‌ها بصورت متناوب ادامه می‌یابد. در

<sup>۱</sup> Staggered  
<sup>۲</sup> Subcritical



محدوده  $1.5 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$  که محدوده گذار<sup>۱</sup> نامیده می‌شود لایه مرزی استوانه مغشوش می‌شود و نقطه جدایی عقب رفته و به زاویه  $140^\circ$  درجه منتقل می‌شود. در این حالت ضریب درگ به مقدار  $0.3$  کاهش می‌یابد. در محدوده گذار، اثرات سه بعدی گردابه‌ها، روند منظم جاری شدن گردابه‌ها را برهم می‌زند و طیف فرکانس‌های جاری شدن گردابه‌ها را پهن‌تر می‌کند. در محدوده اعداد رینولدز فوق بحرانی<sup>۲</sup>،  $Re > 3.5 \times 10^5$ ، جاری شدن منظم گردابه‌ها با وجود لایه مرزی کاملاً مغشوش روی استوانه، دوباره برقرار می‌شود. خلاصه‌ای از رژیم‌های جریان پشت استوانه در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۵- رژیم‌های جریان سیال در پشت استوانه [۹].

<sup>1</sup> Transitional

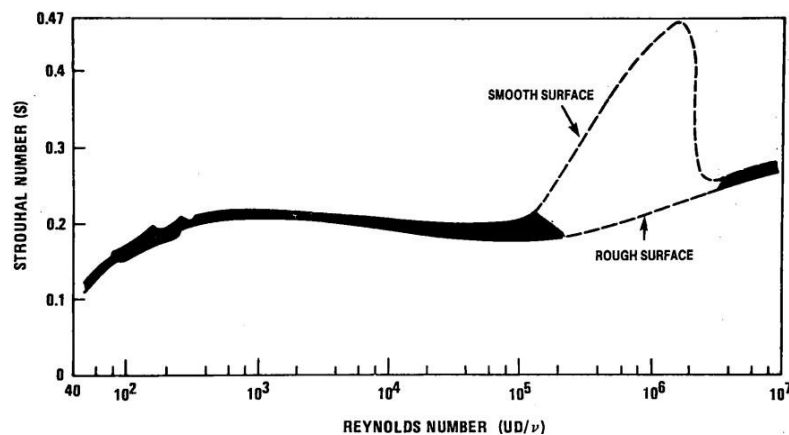
<sup>2</sup> Super critical

## عدد استروهاال

فرکانس جاری شدن گردابه‌ها ( $f_{st}$ ) در پشت یک جسم استوانه‌ای ثابت، با نسبت سرعت جریان آزاد به قطر جسم، متناسب است. عدد بدون بعدی که رابطه بین فرکانس جاری شدن گردابه‌ها در پشت استوانه و سرعت جریان آزاد و ابعاد جسم را مشخص می‌کند عدد استروهاال نامیده می‌شود.

$$St = \frac{f_{st} D}{U_{\infty}} \quad ۲-۱$$

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برای یک جسم استوانه‌ای ثابت، نوسانات در نیروی لیفت (نیروی در جهت عمود بر جریان) در فرکانسی برابر با فرکانس جاری شدن گردابه رخ می‌دهد در حالی که فرکانس نوسانات نیروی درگ (نیروی در راستای جریان)، دو برابر فرکانس جاری شدن گردابه‌ها می‌باشد. عدد استروهاال یک جسم با مقطع دایروی، در یک جریان زیرصوتی، تابعی از عدد رینولدز و در سطح پایینتر، تابعی از زبری سطح و اغتشاش جریان آزاد است. در محدوده  $300 \leq Re \leq 10^5$  عدد استروهاال نزدیک 0.2 باقی می‌ماند. در شکل ۱-۶ تغییرات عدد استروهاال با عدد رینولدز برای جسم استوانه‌ای ثابت، نشان داده شده است.



شکل ۱-۶- تغییرات عدد استروهاال با عدد رینولدز برای جسم استوانه‌ای ثابت [۱۰].

## ۲-۲-۱ اثر حرکت و نوسان جسم بر دنباله ایجاد شده

مطالبی که در قسمت پیشین ارائه شد برای حالتی است که جسم کاملاً ثابت باشد و در مقابل نیروهای نوسانی که به آن وارد می‌شود هیچ گونه جابجایی نداشته باشد. لازم به ذکر است هرگونه نوسان و حرکت جسم، بخصوص ارتعاشاتی با فرکانس نزدیک به فرکانس جاری شدن گردابه‌ها، اثر بزرگی بر شکل‌گیری گردابه‌ها و جاری شدن گردابه‌ها دارد [۳]. به عنوان مثال، ارتعاش یک استوانه می‌تواند سبب بروز تغییرات زیر شود:

۱. افزایش قوت و دوام گردابه‌ها ([۱۱])

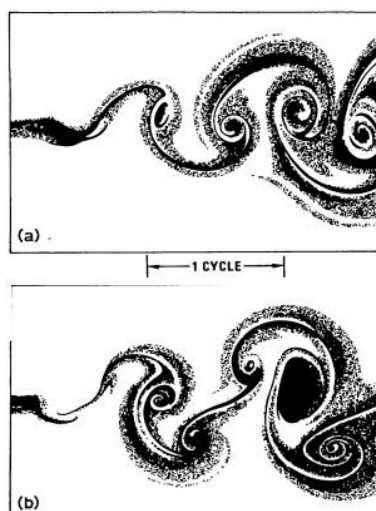
۲. گسترش اندازه دنباله ([۱۲])

۳. ارتعاش استوانه می‌تواند باعث انتقال فرکانس جاری شدن گردابه به فرکانس ارتعاش استوانه گردد [۱۲]. این پدیده قفل شدگی<sup>۱</sup> یا انطباق<sup>۲</sup> نامیده می‌شود و همچنین اگر فرکانس ارتعاش استوانه مضربی از فرکانس جاری شدن گردابه باشد، کمتر توسعه می‌یابد.

۴. افزایش مقدار متوسط درگ استوانه [۱۲].

۵. تغییر فاز، توالی و الگوی گردابه‌ها در دنباله [۴].

باید اشاره نمود در صورتیکه دامنه نوسانات بزرگ باشد، فرکانس جاری شدن گردابه‌ها می‌تواند تا حدود ۴۰ درصد با فرکانس جاری شدن گردابه برای یک استوانه ثابت، اختلاف داشته باشد. استوانه‌ای که در فرکانس‌هایی نزدیک فرکانس جاری شدن گردابه‌ها نوسان می‌کند، الگو و فاز گردابه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هنگامی که فرکانس نوسان استوانه از فرکانس طبیعی جاری شدن گردابه‌ها عبور می‌کند، انتقال فازی حدود ۱۸۰ درجه میان جاری شدن گردابه‌ها و حرکت استوانه بوجود می‌آید. ضدراکویچ<sup>۳</sup> (۱۹۸۲) مشاهده نمود هنگامی که فرکانس ارتعاشات اندکی کمتر از فرکانس طبیعی جاری شدن گردابه‌ها باشد، گردابه‌ها از سمتی مخالف با سمتی که دارای بیشترین جابجایی می‌باشد، تولید می‌شوند و برای فرکانس‌هایی اندکی بالاتر از فرکانس طبیعی جاری شدن گردابه‌ها، گردابه‌ها از همان سمتی جریان می‌یابند که دارای بیشترین جابجایی است. هنگامی که دامنه ارتعاشات استوانه به حدود نصف قطر استوانه می‌رسد، الگوی متقارن تولید گردابه‌ها از بین می‌رود. همانطور که در شکل ۱-۷ نشان داده شده است در دامنه نوسانی برابر با یک قطر استوانه، سه گردابه در هر سیکل نوسان شکل می‌گیرد در حالی که در دامنه‌های ارتعاش کمتر، دو گردابه در هر سیکل ارتعاش تولید می‌شود.



شکل ۱-۷- مسیر گردابه‌ها در پشت استوانه مرتعش در راستای عمود بر جریان در  $Re = 190$ . در شکل بالا نسبت دامن نوسان به قطر برابر ۰.۵ و در شکل پایین برابر ۱ می‌باشد [۱۲].

<sup>1</sup> Lock-in

<sup>2</sup> Synchronization

<sup>3</sup> Zdravkovich

مقدار متوسط درگ استوانه‌ای که در فرکانس جاری شدن گردابه یا نزدیکی آن ارتعاش می‌کند نیز تابعی از دامنه ارتعاشات است. درگ با افزایش دامنه ارتعاشات در راستای عمودی جریان، افزایش می‌یابد. معادلاتی برای بیان رابطه میان ضریب درگ و دامنه نوسانات در راستای عمودی جریان، پیشنهاد شده است که برخی از آنها در معادله ۳-۱ آمده است.

$$\frac{C_D|_{A_y > 0}}{C_D|_{A_y = 0}} = \begin{cases} 1 + 1.043(2A_y / D)^{0.65} & [13] \\ 1 + 2.1(A_y / D) & [14] \end{cases} \quad 3-1$$

که در این رابطه،  $A_y$  دامنه نوسان در جهت عرضی جریان ( $y$ ) می‌باشد.

### ۳-۲-۱ جسم VIV، ویژگی‌های پدیده VIV

واضح‌ترین تعریفی که می‌توان برای یک جسم مستعد برای تولید گردابه‌های با ساختار نوسانی ارائه نمود (جسم دماغه پهن<sup>۱</sup>) بدین ترتیب است که جسمی است الاستیک یا بطور الاستیکی مهار شده، با جرم و استهلاک<sup>۲</sup> مناسب، که بدلیل شکل خاص خود در اعداد رینولدز به اندازه کافی بزرگ، باعث جدایش جریان و ایجاد لایه‌های برشی می‌شود که در نتیجه برخورد این لایه‌ها و جریان آزاد، دنباله‌ای بی‌ثبات تولید می‌شود. چنین جسمی، جسم VIV نامیده می‌شود. اگر یک جسم VIV در معرض جریانی پایا و یکنواخت قرار گیرد، بوسیله گردابه‌هایی که جاری می‌کند تحریک شده و در صورتیکه بصورت الاستیک مهار شده باشد، ارتعاش می‌کند. هنگامی که فرکانس جاری شدن گردابه‌ها و فرکانس طبیعی جسم به یک مقدار مشترک نزدیک شوند، جسم شروع به ارتعاش می‌کند. در حالتی که سیال کاری آب باشد، به نظر می‌رسد این مقدار مشترک، مقداری نزدیک فرکانس طبیعی جسم در آب ساکن می‌باشد ([۳] و [۱۵]). این ارتعاشات همانگونه که ذکر شد، باعث افزایش طول همبستگی<sup>۳</sup> گردابه‌ها می‌شود. حرکت ارتعاشی که در جسم تولید می‌شود به عوامل بسیاری از جمله جرم جسم، الاستیسیته عامل مهارکننده جسم، تعداد درجات آزادی جسم، استهلاک سازه‌ای، حرکت سیال پیرامون جسم و سایر پارامترهای پیچیده تر بستگی دارد. به عنوان مثال برای بررسی نوسانات القا شده توسط جریان بر یک جسم استوانه‌ای، اغلب درجات آزادی جسم را به یک یا دو درجه محدود می‌کنند. لذا پژوهشهای تجربی که در این زمینه انجام شده است را به دو گروه عمده می‌توان تقسیم نمود:

<sup>1</sup> Bluff body

<sup>2</sup> Damping

<sup>3</sup> Correlation length