



دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

عنوان پایان نامه:

# بررسی اثرات پدیده قفل شدگی فرکانسی در ارتعاشات ناشی از جریان سیال

مؤلف:

علی رضا خاتمی جویباری

پایان نامه کارشناسی ارشد

زمستان ۱۳۸۹





دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان پایان نامه:

**بررسی اثرات پدیده قفل شدگی فرکانسی**

**در ارتعاشات ناشی از جریان سیال**

مؤلف:

**علی رضا خاتمی جویباری**

ارائه شده جهت اخذ درجه ی کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

استاد راهنما:

**دکتر انوشیروان فرشیدیان فر**

زمستان ۱۳۸۹

## چکیده

هدف از این تحقیق معرفی ارتعاش گردابه محرک و پدیده قفل شدگی فرکانسی، مدل‌سازی و حل اینگونه از مسائل به همراه بررسی عوامل تاثیر گذار بر آن با تکیه بر نتایج آزمایشگاهی که در چند سال اخیر انجام گرفته و مقایسه با آنها می باشد. مدل‌سازی این پدیده با استفاده از روش کوپل جریان-سازه و حل غیر خطی آن با استفاده از روش اختلال و بهره گیری از روش مقیاس مضاعف انجام شده است. همچنین سعی شده که شروع و پایان ناحیه قفل شدگی فرکانسی که از پدیده های مخرب این نوع از ارتعاش می باشد به همراه ماکزیمم دامنه ارتعاش سیال پیش بینی شود. روش مقیاس مضاعف روشی بسیار مناسب برای مسائل ارتعاش غیر خطی است که دارای مولفه های میرایی می باشند. با تکیه بر این روش به خوبی می توان پاسخهای ناشی از رفتار هیستریزس سازه را شناسایی و اندازه گیری نمود که از مزایای این روش حل نسبت به دیگر روش ها می باشد. بررسی عوامل تاثیر گذار بر پدیده قفل شدگی فرکانسی در ارتعاشات گردابه محرک و نیز تحلیل دو شاخه شدگی به منظور تعیین نواحی مختلف از نظر رفتار هیستریزس از دیگر بررسی های انجام گرفته در این تحقیق می باشد. مقایسه نتایج کار با داده های آزمایشگاهی مطابقت قابل قبولی را چه از نظر پیش بینی ناحیه قفل شدگی فرکانسی و محدوده های نوسان و چه از نظر پیش بینی رفتار هیستریزس از خود نشان می دهند.

## واژه‌های کلیدی:

ارتعاشات گردابه محرک- روش کوپل جریان سازه - قفل شدگی فرکانسی - MMS- تحلیل

دو شاخه شدگی

## فهرست

IV ..... فهرست اشکال به کار رفته در متن

V ..... فهرست علائم و اختصارات

## فصل اول

۱ ..... مقدمه ای بر ارتعاشات گردابه محرک و آشنایی با مفاهیم سیالاتی آن

۲ ..... (۱-۱) پیشگفتار

۳ ..... (۱-۲) پیکر بندی پروژه

۴ ..... (۱-۳) دنباله گردابه ای فون کارمن

۷ ..... (۱-۴) جریان خارجی حول استوانه ساکن

۱۲ ..... (۱-۵) جریان خارجی حول استوانه متحرک

۱۳ ..... (۱-۵-۱) مود  $2s$

۱۴ ..... (۱-۵-۲) مود  $2p$

۱۶ ..... (۱-۶) ارتعاشات گردابه محرک

۲۲ ..... (۱-۷) عوامل موثر بر قفل شدگی فرکانسی

۲۳ ..... (۱-۷-۱) اثر جرم و میرایی

۲۵ ..... (۱-۷-۲) اثر درجه آزادی

۲۷ ..... (۱-۷-۳) اثر شکل سازه

## فصل دوم

۳۱ ..... مروری بر فعالیت های انجام شده در زمینه مدلسازی و حل مسائل VIV

۳۲ ..... (۲-۱) مقدمه

۳۲ ..... (۲-۲) مدل کوپل جریان-سازه

- ۳۵ ..... مدل یک درجه آزادی (۲-۳)
- ۳۶ ..... مدل تجزیه نیرو (۲-۴)
- ۳۷ ..... روشهای عددی (۲-۵)
- ۳۸ ..... مدل درون سلولی گردابه (۲-۵-۱)
- ۳۸ ..... شبیه سازی عددی مستقیم (۲-۵-۲)
- ۳۹ ..... روش اجزاء محدود (۲-۵-۳)
- ۴۰ ..... دسته بندی از نظر روشهای کد نویسی (۲-۶)
- ۴۱ ..... نتیجه گیری و مقایسه (۲-۷)

## فصل سوم

- ۴۲ ..... مدلسازی و حل تحلیلی ارتعاشات غیر خطی گردابه محرک
- ۴۳ ..... مقدمه (۳-۱)
- ۴۳ ..... مدلسازی (۳-۲)
- ۵۱ ..... حل تحلیلی (۳-۳)
- ۵۹ ..... بررسی و مقایسه پاسخها (۳-۴)
- ۶۳ ..... نتیجه گیری (۳-۵)

## فصل چهارم

- ۶۶ ..... بررسی رفتار ارتعاشی سازه تحت اثر جریان گردابه ای با تغییر پارامترهای اصلی آنها
- ۶۷ ..... مقدمه (۴-۱)
- ۶۷ ..... اثر میرایی (۴-۲)
- ۶۹ ..... اثر نسبت چگالی (۴-۳)
- ۷۰ ..... مقایسه با نمودار اسکاپ گریفین (۴-۴)
- ۷۲ ..... تحلیل دو شاخه شدگی (۴-۵)

۷۴ ..... Hopf (۴-۵-۱) دو شاخه شدگی از نوع

۷۵ ..... (۴-۵-۲) دو شاخه شدگی از نوع نقطه زینی

۷۶ ..... (۴-۶) نتیجه گیری

#### فصل پنجم

۷۸ ..... نتیجه گیری

۷۹ ..... (۵-۱) دستاورد ها و نتایج حاصله

۸۰ ..... (۵-۲) پیشنهادات برای ادامه کار

۸۲ ..... مراجع

## فهرست اشکال به کار رفته در متن:

شماره شکل	نام شکل	صفحه مربوطه
شکل (۱-۱)	لایه مرزی ایجاد شده در جریان سیال عبوری از روی جسم صاف و رژیم های مختلف آن	صفحه ۵
شکل (۱-۲)	تغییرات شیب سرعت سیال در هنگام وقوع پدیده جدایش	صفحه ۶
شکل (۱-۳)	دنباله گردابه ای فون کارمن که در اثر عبور سیال از روی استوانه ایجاد شده است	صفحه ۶
شکل (۱-۴)	ضریب پسا برای سطح مقطع های مختلف	صفحه ۷
شکل (۱-۵)	استوانه صلب که به صورت عرضی در معرض جریان سیال قرار دارد	صفحه ۸
شکل (۱-۶)	جریان سیال اگر عدد رینولدز جریان کوچکتر از ۵ باشد	صفحه ۸
شکل (۱-۷)	جریان سیال اگر عدد رینولدز جریان کوچکتر از ۴۰ باشد	صفحه ۹
شکل (۱-۸)	جریان سیال اگر عدد رینولدز جریان کوچکتر از ۱۵۰ باشد	صفحه ۹
شکل (۱-۹)	جریان سیال اگر عدد رینولدز جریان کوچکتر از محدوده بحرانی باشد	صفحه ۱۰
شکل (۱-۱۰)	عبور سیال از روی استوانه در محدوده ای که در آن با حالت گذار مواجهیم	صفحه ۱۰
شکل (۱-۱۱)	جریان سیال پس از عبور از ناحیه گذار	صفحه ۱۱
شکل (۱-۱۲)	نمودار تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز به همراه رژیم شکل گیری گردابه ها در هر منطقه	صفحه ۱۲
شکل (۱-۱۳)	مود های مختلف شکل گیری دنباله گردابه ای در حالت استوانه غیر ثابت	صفحه ۱۳
شکل (۱-۱۴)	نقشه تشکیل مود های مختلف دنباله گردابه ای در سرعت های بی بعد مختلف	صفحه ۱۵
شکل (۱-۱۵)	استوانه صلب یک در جه آزادی در معرض جریان سیال	صفحه ۱۶
شکل (۱-۱۶)	نمودار تغییرات عدد اشتروهل بر حسب عدد رینولدز	صفحه ۱۷
شکل (۱-۱۷)	رابطه بین پارامتر های بی بعد سرعت، دامنه ارتعاش، زاویه فاز و فرکانس ارتعاش در حالت قفل شدگی فرکانسی	صفحه ۲۰
شکل (۱-۱۸)	تغییر فاز ناگهانی هنگام خروج از ناحیه قفل شدگی فرکانسی	صفحه ۲۲
شکل (۱-۱۹)	بررسی تاثیر نسبت چگالی بر دامنه ارتعاش و نا پایداری سازه	صفحه ۲۴
شکل (۱-۲۰)	مقایسه پاسخ ارتعاشی استوانه در حالت یک و دو درجه آزادی	صفحه ۲۶
شکل (۱-۲۱)	تغییرات پروفیل فشار در فاصله تشکیل دو گردابه	صفحه ۲۷
شکل (۱-۲۲)	helical strake نمودن دودکش ها جهت جلوگیری از وقوع قفل شدگی فرکانسی	صفحه ۲۸
شکل (۱-۲۳)	خط جریانی کردن سطح مقطع با استفاده از مکانیزم ایرفویل	صفحه ۲۹
شکل (۱-۲۴)	قرار دادن یک استوانه کنترل جهت بر هم زدن نظم جریان و کاهش نیروی برا و پسا	صفحه ۳۰
شکل (۳-۱)	استوانه صلب یک درجه آزادی در معرض جریان سیال	صفحه ۴۴
شکل (۳-۲)	نمودار تغییرات ضریب پسا با عدد رینولدز در نسبت های قطر به طول مختلف	صفحه ۴۷
شکل (۳-۳)	دامنه بی بعد ارتعاش بر حسب سرعت بی بعد	صفحه ۶۱
شکل (۳-۴)	تغییرات زاویه فاز $\varphi$ بر حسب سرعت بی بعد	صفحه ۶۲
شکل (۳-۵)	تغییرات پارامتر گردابه بر حسب سرعت بی بعد	صفحه ۶۳
شکل (۴-۱)	تغییرات دامنه بر حسب سرعت در نسبت میرایی های مختلف	صفحه ۶۸
شکل (۴-۲)	تغییرات دامنه بی بعد بر حسب تغییرات نسبت فرکانس	صفحه ۶۹
شکل (۴-۳)	نمودار تغییرات بی بعد دامنه بر حسب سرعت در $m^*$ های مختلف	صفحه ۷۰
شکل (۴-۴)	نمودار تغییرات ماکزیمم دامنه بر حسب پارامتر $S_G$	صفحه ۷۱
شکل (۴-۵)	نمونه ای از رفتار ارتعاشی سازه تحت اثر VIV در $m^*$ بالا	صفحه ۷۲
شکل (۴-۶)	نتایج حاصل از تحلیل دو شاخه شدگی با در نظر گرفتن $k$ به عنوان پارامتر کنترل	صفحه ۷۶



## فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی به کار رفته:

جرم کاهش یافته	$m^*$	سرعت سیال عبوری از روی استوانه	$U$
ضریب جرم اضافه شده سیال	$a_f$	قطر استوانه	$d$
میرایی سازه	$C_s$	چگالی سیال	$\rho$
میرایی ناشی از حضور سیال در اطراف استوانه	$C_f$	عدد رینولدز	Re
نیروی برای است که از طرف سیال به استوانه وارد می شود	$F_f$	عدد اشتروهال	St
ضریب برا	$C_l$	فرکانس تشکیل گردابه ها	$f_s$
جرم کل در واحد طول استوانه	$m_t$	متغیر بی بعد شده سرعت	$U_r$
فرکانس زاویه ای ارتعاش استوانه	$\omega_n$	فرکانس ارتعاش سازه	$f_n$
متغیر بی بعد تغییر مکان استوانه	$x$	فرکانس تشکیل گردابه ها	$f_s$
نیروی که از طرف سازه به سیال وارد می شود	$F_s$	متغیر تغییر مکان عمودی استوانه	$r(t)$
پارامترهایی که از نتایج تجربی استخراج می شوند	$\beta$ و $B$	مجموع میرایی سازه و میرایی ناشی از وجود سیال	$C_t$
ضریب پسا در حالت استوانه ثابت در محدوده رینولدز مورد بررسی	$C_d$	مولفه فنریت سازه	$k$
پارامتر اسکاپ-گریفین	$S_G$	مجموع جرم استوانه و جرم اضافه شده سیال	$M_t$
		جرم استوانه	$m_s$
		جرم اضافه شده سیال	$m_f$
		قطر استوانه	$d$
		طول استوانه	$l$

## علائم یونانی به کار رفته:

نسبت میرایی کل	$\xi_t$
معرف میزان عدم انطباق $\omega_f$ و $\omega_s$	$\Delta$
زاویه بین راستای ارتعاش جسم با جهت نیرویی که سیال به آن وارد می کند	$\varphi$
چگالی سیال	$\rho_f$
نسبت میرایی سازه	$\xi_s$
نسبت میرایی سیال	$\xi_f$
فرکانس زاویه ای تشکیل گردابه	$\omega_s$
نسبت فرکانس تشکیل گردابه ها	$\omega_0$
متغیر معرف میزان غیر خطی	$\mathcal{E}$
لزجت دینامیکی سیال	$\mu$

فصل اول:

# معرفی ارتعاشات گردابه محرک و آشنایی با مفاهیم سیالاتی آن

## (۱-۱) پیشگفتار

ارتعاشات گردابه محرک<sup>۱</sup> که اختصاراً آن را VIV می‌نامیم به نوعی از ارتعاش ناشی از جریان سیال گفته می‌شود که در آن عامل ارتعاش دنباله گردابه ای فون کارمن<sup>۲</sup> است که در اثر جدایش جریان سیال که از روی یک سطح غیر تخت یا زاویه دار عبور می‌کند ایجاد می‌شود. در این حالت با ترکیبی از نیروی برا<sup>۳</sup> و پسا<sup>۴</sup> وابسته به زمان و غیر منسجم مواجه خواهیم بود. در این بحث جسم مورد بررسی را یک استوانه که در معرض جریان عرضی قرار گرفته در نظر می‌گیریم. چنانچه استوانه بخشی از یک سازه باشد که در راستای عمود بر جریان به آن آزادی حرکت داده ایم تداوم این روند منجر به افزایش دامنه ارتعاش در اثر نیروی برا وارده و در محدوده خاصی از سرعت سیال سبب ناپایداری و از هم گسیختگی می‌گردد. سازه‌های بسیاری چون ساختمانها، برجها، خطوط لوله، کابل‌ها و پل‌ها در معرض چنین جریانهایی قرار دارند که باید از نظر پدیده مخرب VIV آنها را در محدوده ایمن طراحی قرار داد. اخبار مختلف از خسارات این پدیده در گوشه و کنار جهان و تحقیقات علمی مختلف و متنوعی که در این زمینه در چند دهه اخیر انجام گرفته شاهد این مدعا هستند. این پدیده بخصوص در نیم قرن اخیر توجه محققین را به خود معطوف داشته است و آزمایشات بسیاری با اهداف مختلف و چندین روش برای مدلسازی و حل مسائل مرتبط با آن انجام گرفته و پیشنهاد شده است.

در متن حاضر مدلسازی پدیده قفل شدگی فرکانسی در ارتعاشات ناشی از جریان سیال با استفاده از روش کوپل جریان-سازه<sup>۵</sup> و حل غیر خطی آن با استفاده از روش اختلال<sup>۶</sup> و بهره‌گیری از روش مقیاس مضاعف<sup>۷</sup> انجام شده است.

---

<sup>1</sup> Vortex-induced vibration

<sup>2</sup> von Karman vortex street

<sup>3</sup> Lift

<sup>4</sup> Drag

<sup>5</sup> Wake-body coupled model

<sup>6</sup> Perturbation

<sup>7</sup> Method of Multiple Scale (MMS)

همچنین سعی شده که شروع و پایان ناحیه قفل شدگی فرکانسی<sup>۱</sup> که از پدیده های مخرب این نوع از ارتعاش می باشد به همراه ماکزیمم دامنه ارتعاش سیال پیش بینی شود. همچنین با توجه به نتایج مدلسازی پدیده ارتعاش گردابه محرک سعی در بررسی اثر عوامل مختلف بر آن خواهیم داشت. دو عامل که در اکثر مقالات به عنوان فاکتور های اصلی ارتعاشی در این پدیده مورد نظر بوده اند یکی نسبت چگالی و دیگری میرایی می باشد. در واقع با تغییر شرایط سازه و سیال و حل مساله با استفاده از مدلسازی انجام شده و مقایسه آن با یافته های دیگران سعی در اثبات میزان درستی حل تحلیلی خواهیم داشت. در ادامه با استفاده از تحلیل دو شاخه شدگی و انتخاب میرایی به عنوان پارامتر کنترل، اثر این عامل را بر شروع رفتار هیستریزیس<sup>۲</sup> و پایان ناحیه قفل شدگی بررسی خواهیم کرد.

## (۱-۲) پیکر بندی پروژه:

فصل اول این پایان نامه به معرفی پدیده VIV و برخی از مفاهیم سیالاتی مرتبط با آن می پردازد و شامل برخی از نتایج آزمایشگاهی انجام گرفته در این زمینه نیز می باشد. در فصل دوم مروری بر یافته های تحلیلی و انواع روشهای مدل سازی پدیده VIV در محدوده قفل شدگی فرکانسی و مقایسه آنها خواهیم داشت. در این فصل همچنین انواع روشهای عددی شبیه سازی جریان سیال و حل مسائل ارتعاشات گردابه محرک به صورت کلی معرفی شده است. در فصل سوم با استفاده از مدل کوپل جریان-سازه به مدل سازی پدیده VIV پرداخته و با بهره گیری از روش اختلال، و با استفاده از تکنیک مقیاس مضاعف MMS به حل تحلیلی مساله خواهیم پرداخت. در نهایت نتایج حل با یافته های دیگر محققین مقایسه شده و نقاط قوت و ضعف کار بیان خواهد شد.

<sup>1</sup> Lock-in

<sup>2</sup> hysteresis

در فصل چهارم با تکیه بر روش حل ارائه شده در فصل قبل اثر عوامل مختلف را بر پدیده قفل شدگی فرکانسی بررسی می کنیم. همچنین جهت تعیین محدوده قفل شدگی فرکانسی و مشخص نمودن بازه ای که در آن با رفتار هیستریزیس مواجهیم از تحلیل دو شاخه شدگی بهره می گیریم. فصل آخر شامل صحبت پایانی در مورد نتیجه گیری کلی پیرامون این تحقیق و ارائه پیشنهاداتی جهت ادامه کار در این زمینه می باشد.

### (۱-۳) دنباله گردابه ای فون کارمن :

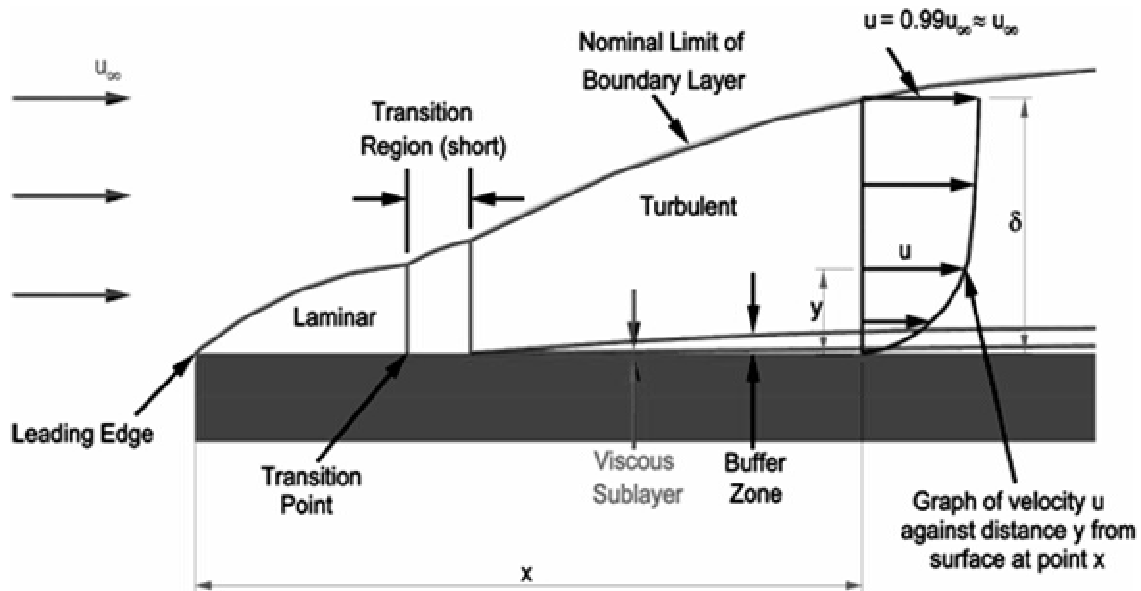
هنگامی که سیالی از روی سطح یک جسم عبور می کند، از آنجایی که سیال در سطح تماس با جسم به آن می چسبد، سرعت نسبی سیال به سطح در آن نقطه مساوی صفر می شود. با فاصله گرفتن از سطح جسم این سرعت به تدریج زیاد شده تا در نهایت به سرعت واقعی سیال  $U$  می رسیم. این محدوده اصطلاحاً لایه مرزی نامیده می شود و ضخامت آن بستگی به عواملی چون عدد رینولدز، نوع جریان و... دارد. عدد رینولدز را برای جریانی که از روی یک استوانه عبور می کند به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (1-1)$$

در فرمول فوق  $U$  سرعت سیال عبوری از روی استوانه،  $d$  قطر استوانه،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال و  $\rho$  چگالی سیال می باشد. لایه مرزی می تواند به صورت آرام یا درهم باشد که بستگی به میزان عدد رینولدز یا فاصله طولی از ابتدای جسم دارد. در واقع هرچه قدر از ابتدا در طول جسم پیش می رویم ضخامت لایه مرزی زیاد و زیاد تر شده تا آنجا که پس از عبور از ناحیه گذار<sup>۱</sup> رژیم جریان داخل لایه مرزی تغییر شکل می دهد و به رژیم درهم تغییر حالت می دهد. این پدیده با تغییر

<sup>1</sup> Transition Resion

فشار قابل توجهی همراه است و باید گفت جریان درهم نسبت به آرام ضخامت بیشتری دارد. این دو رژیم جریان در شکل (۱-۱) به خوبی قابل مشاهده هستند:

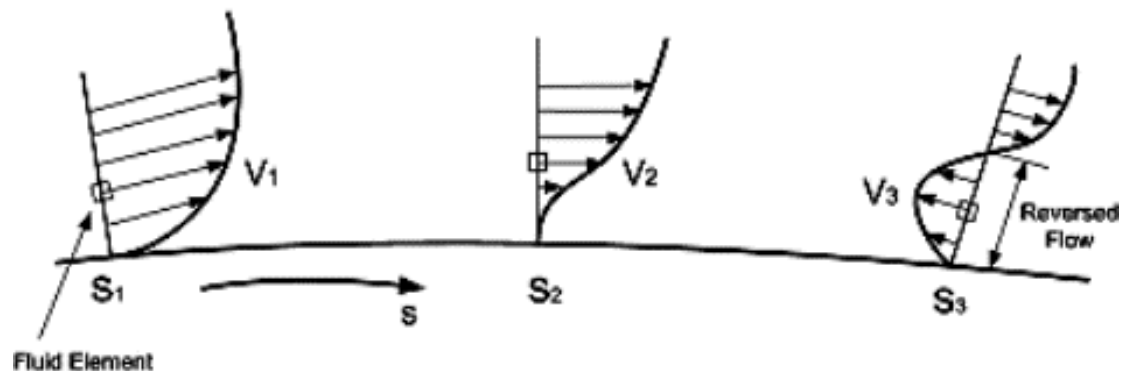


شکل (۱-۱) لایه مرزی ایجاد شده در جریان سیال عبوری از روی جسم صاف

و رژیم های مختلف آن [1].

با توجه به شکل (۱-۲) اگر جسم زاویه دار یا غیر صاف باشد ممکن است در بخشی از مسیر جریان اختلاف فشار به حدی برسد که شیب تغییرات سرعت در راستای عمود بر سطح به صفر برسد. در چنین حالتی به آستانه وقوع پدیده ای به نام جدایش می رسیم که نقشی اساسی در بسیاری از مطالعات مهندسی در زمینه سیالات، هوافضا و ارتعاشات دارد. در واقع در این حالت به علت انحنای سطح و نیز افزایش ضخامت لایه مرزی فشار پایین دست به قدری زیاد می شود که با مقدار آن در بالادست لایه مرزی برابر می شود. در چنین حالتی تغییرات سرعت در راستای عمود بر سطح صفر می شود و اگر کمی در روی سطح پیش برویم با شیب فشار منفی مواجه خواهیم شد که نتیجه آن عکس شدن جهت سرعت در داخل پایه مرزی و در نزدیکی سطح نسبت به جهت جریان سیال است. در اینجا چون به سیال در لایه مرزی از دو جهت نیرو وارد می شود (هم جهت

و خلاف جهت) سیال در پایین دست به گردش در آمده و تولید گردابه می کند. این گردابه ها به طور منظم و با فرکانس خاصی تشکیل می شوند و به سمت پایین دست جریان حرکت می کنند.



شکل (۱-۲) تغییرات شیب سرعت سیال در هنگام وقوع پدیده جدایش [1].

اگر سطح مقطع جسم متقارن باشد و جریان هم از بالا و هم از پایین آن عبور کند، گردابه ها به صورت یکی در میان، در بالا و پایین ایجاد می شوند و به پیش می روند. این دنباله گردابه ای به دنباله گردابه ای فون کارمن موسوم است، شکل (۱-۳):

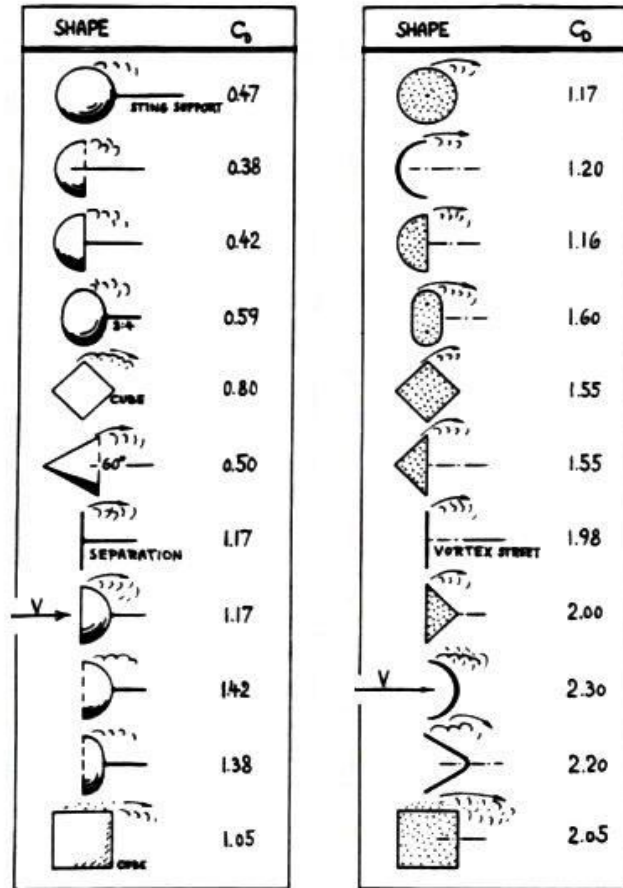


شکل (۱-۳) دنباله گردابه ای فون کارمن که در اثر عبور سیال از روی استوانه ایجاد شده است [2].

پدیده جدایش با تغییرات فشار زیادی همراه است و چون در سمت بالا یا پایین جسم ایجاد می شود در اثر این اختلاف فشار یک نیروی عمودی به جسم وارد می شود که به آن نیروی برا می گوئیم. نیروی برا در کنار نیروی پسا که جریان سیال به جسم وارد می کند، از اساسی ترین مباحث در



جریان خارجی می باشند که باید به آنها توجه داشت. بسته به سطح مقطع جسم نیروهای برا و پسا می توانند تغییر کنند. به عنوان مثال در شکل (۴-۱) ضریب پسا برای بعضی از سطح مقطع ها داده شده است:



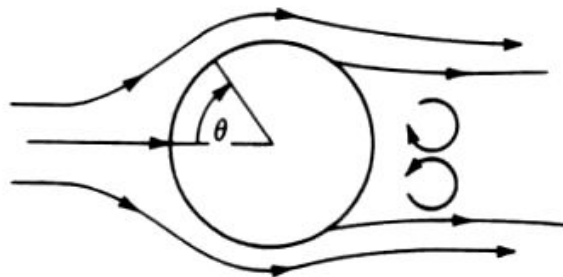
شکل (۴-۱) ضریب پسا برای سطح مقطع های مختلف: ستون سمت راست مربوط به حالت دو

بعدی و ستون سمت چپ مربوط به حالت سه بعدی می باشد [1].

#### (۴-۱) جریان خارجی حول استوانه ساکن :

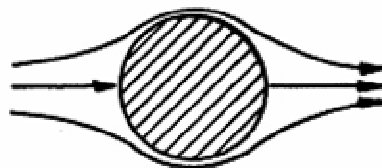
در بخش قبلی توضیحات اولیه ای در رابطه با نیروهای برا و پسا داده شد. در این بخش به بررسی جریان خارجی حول استوانه ساکن می پردازیم. استوانه یکی از اشکال هندسی است که به خاطر سطح مقطع همسان و پراکندگی که دارد نسبت به بقیه اشکال هندسی در زمینه جریان خارجی

بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. استوانه صلب شکل (۵-۱) را که به صورت عرضی در معرض جریان سیال قرار گرفته است را در نظر می‌گیریم. در این حالت فرض می‌کنیم همه متغیرهای مساله اعم از قطر و طول استوانه، شرایط سیال و ... ثابت باشند و تنها متغیر را سرعت سیال در نظر می‌گیریم.



شکل (۵-۱) استوانه صلب که به صورت عرضی در معرض جریان سیال قرار دارد

اگر سرعت سیال خیلی کم ( عدد رینولدز کمتر از ۵) باشد، سیال به آرامی از روی سطح استوانه عبور می‌کند. در این حالت جریان سیال آرام است و جدایش هم اتفاق نمی‌افتد. می‌توان گفت نیروهای آیرودینامیکی ناچیز و یا حتی صفر می‌باشد و از آنجا که این حالت در طبیعت بسیار کم اتفاق می‌افتد از بررسی آن صرفنظر می‌کنیم شکل (۶-۱):

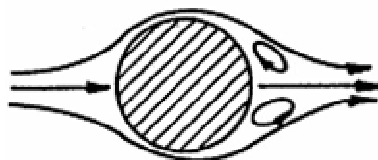


شکل (۶-۱) جریان سیال اگر عدد رینولدز جریان کوچکتر از ۵ باشد، [3]

اگر سرعت جریان قدری افزایش یابد ( عدد رینولدز کمتر از ۴۰) همانطور که در بخش قبل به آن اشاره شد با پدیده جدایش مواجه می‌شویم. در این حالت گردابه‌ها در دو سمت بالا و پایین استوانه به صورت متقارن و همزمان تشکیل می‌شوند. جریان سیال همچنان آرام است و رژیم شکل

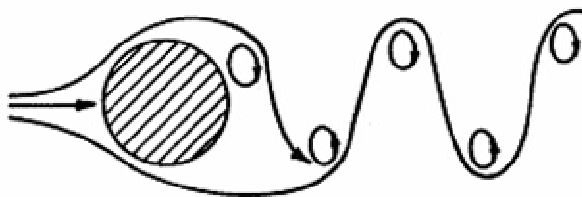
گیری گردابه ها هم آرام می باشد. این حالت هم همانند حالت قبلی کم اتفاق می افتد دلیل این امر را هم می توان به بسیار پایین بودن عدد رینولدز در این حالت اشاره کرد که شرط وقوع آن داشتن یک سیال بسیار لزج می باشد که به عنوان مثال برای هوا وقوع این پدیده در طبیعت تقریباً غیر ممکن است، شکل (۷-۱):

با آغاز شکل گیری گردابه ها ضریب پسا به علت افزایش فشار در پایین دست کاهش می یابد و ضریب برا همچنان صفر است.



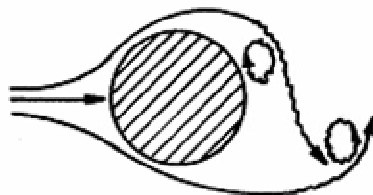
شکل (۷-۱) جریان سیال اگر عدد رینولدز جریان کوچکتر از ۴۰ باشد،  $Re < 40$  [3]

اگر سرعت سیال را قدری بیشتر کنیم ملاحظه می شود که دیگر شکل گیری گردابه ها به صورت همزمان اتفاق نمی افتد بلکه به صورت یکی در میان در بالا و پایین استوانه ایجاد می شوند. این غیر همزمانی سبب آن می شود که علاوه بر نیروی پسا افقی یک نیروی برا عمودی و متناوب نیز از بالا و پایین به استوانه وارد شود. این گردابه ها با فرکانس ثابتی تشکیل می شوند که با عدد اشتروهل متناسب می باشند و در فصول بعد به طور مفصل به آن خواهیم پرداخت. در این شرایط همچنان جریان سیال آرام و رژیم شکل گیری گردابه ها نیز آرام است. به علت غیر هم زمان تشکیل شدن گردابه ها در این حالت با افزایش نیروی پسا مواجهیم: شکل (۸-۱)



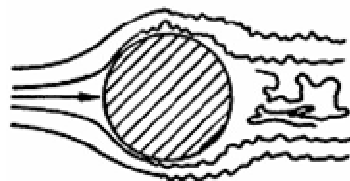
شکل (۸-۱) جریان سیال اگر عدد رینولدز جریان کوچکتر از ۱۵۰ باشد،  $40 < Re < 150$  [3]

می دانیم آستانه تغییر از جریان آرام و حرکت به سوی جریان درهم برای آستانه از عدد رینولدز حدود  $Re = 3 \times 10^5$  است. ولی تغییرات از حالت آرام به درهم برای گردابه ها سریعتر اتفاق می افتد. در این حالت در عین حالیکه رژیم جریان آرام است، دنباله گردابه ای رو به در هم شدن می گذارد. این اتفاق نه تنها سبب آن می شود که از افزایش نیروی پسا جلوگیری شود بلکه در محدوده وسیعی از عدد رینولدز ضریب پسا را ثابت نگه می دارد. این روند تا آستانه درهم شدن جریان سیال ادامه می یابد شکل (۹-۱):



شکل (۹-۱) جریان سیال اگر عدد رینولدز جریان کوچکتر از محدوده بحرانی باشد [3]

در محدوده ای از عدد رینولدز که جریان سیال در حال گذار از آرام به درهم به سر می برد به علت اغتشاش زیاد جریان پیش بینی رفتار سیال چه در بالا دست و چه در پایین دست بسیار مشکل است و باید گفت به علت تغییر فشار ناشی از درهم شدن جریان ضریب پسا کاهش می یابد به گونه ای که کمترین مقدار ضریب پسا در این ناحیه قابل مشاهده است شکل (۱۰-۱).



شکل (۱۰-۱) عبور سیال از روی آستانه در محدوده ای که در آن با حالت گذار مواجه هستیم [3]