





سوگند نامه دانش آموختگان دانشگاه تربیت معلم سبزوار

به نام خداوند جان و خرد  
کزین برتر اندیشه بر نگذرد

اینک که به خواست آفریدگار پاک ، کوشش خویش و بهره گیری از دانش استادان و سرمایه‌های مادی و معنوی این مرز و بوم، توشه ای از دانش و خرد گرد آورده‌ام، در پیشگاه خداوند بزرگ سوگند یاد می کنم که در به کارگیری دانش خویش، همواره بر راه راست و درست گام بردارم. خداوند بزرگ، شما شاهدان، دانشجویان و دیگر حاضران را به عنوان داورانی امین گواه می گیرم که از همه دانش و توان خود برای گسترش مرزهای دانش بهره گیرم و از هیچ کوششی برای تبدیل جهان به جایی بهتر برای زیستن، دریغ نوزم. پیمان می بندم که همواره کرامت انسانی را در نظر داشته باشم و ممنوعان خود را در هر زمان و مکان تا سر حد امکان یاری دهم. سوگند می خورم که در به کارگیری دانش خویش به کاری که با راه و رسم انسانی، آیین پرهیزگاری، شرافت و اصول اخلاقی برخاسته از ادیان بزرگ الهی، به ویژه دین مبین اسلام، مابینت دارد دست نیازم. همچنین در سایه اصول جهان شمول انسانی و اسلامی، پیمان می بندم از هیچ کوششی برای آبادانی و سرافرازی میهن و هم میهنانم فروگذاری نکنم و خداوند بزرگ را به یاری طلبم تا همواره در پیشگاه او و در برابر وجدان بیدار خویش و ملت سرافراز ، بر این پیمان تا ابد استوار بمانم.

نام و نام خانوادگی وامضای دانشجو



دانشگاه تربیت معلم سبزوار

# دانشگاه تربیت معلم سبزوار

دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

بررسی تجربی آیرودینامیک سیم ها و کابل های خطوط انتقال نیرو و نگهدارنده ها

استاد راهنما :

دکتر امیر بک خوشنویس

نگارش :

محمد اسحقى گرجى

اسفند ۱۳۹۰

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم، به از خود گذشتگانی که  
توانشان رفت تا من به توانایی رسم به اسوه های مقدسی که  
درس صفا و انسانیت و ایثار را به من آموختند و به سرچشمه  
های جوشان محبت که من از درک ارزش گوهر وجودشان  
عاجزم و از قدردانی زحماتشان غافل.

## تقدیر و تشکر:

مطالب گردآوری شده این پروژه، حاصل راهنمایی های ارزنده  
استاد گرانقدر

جناب آقای دکتر خوشنویس می باشد که در این

راه، از هیچ گونه بذل توجهی دریغ نفرموده و خالصانه مرا  
راهنمایی کرده اند و بدین وسیله مراتب قدردانی و سپاس خود  
را از این بزرگوار اعلام می دارم

قال علی علیه السلام : من علّمني حرفاً فقد سیّرنی عبدا



دانشگاه جزیره گیلان

## فرم چکیده‌ی پایان‌نامه‌ی دوره‌ی تحصیلات تکمیلی

### دفتر مدیریت تحصیلات تکمیلی

نام خانوادگی دانشجو: اسحق‌ی گرجی	نام: محمد	ش دانشجویی: ۸۸۱۳۸۰۱۰۹۰
استاد راهنما: دکتر امیر بک خوشنویس	استاد مشاور: -	
دانشکده: فنی و مهندسی	رشته: مکانیک	گرایش: تبدیل انرژی
مقطع: کارشناسی ارشد	تاریخ دفاع: ۹۰/۱۲/۶	تعداد صفحات: ۱۰۶

### عنوان پایان‌نامه: بررسی تجربی آیرودینامیک سیم‌ها و کابل‌های خطوط انتقال نیرو و نگهدارنده‌ها

کلیدواژه‌ها: جریان سنج سیم داغ - زبری سطح - سطح شیاردار - خطوط انتقال برق - نیروی باد - پروفیل سرعت - پروفیل  
اغتشاشات

### چکیده

در این رساله تجربی، تاثیر نیروی باد بر کابل‌ها یا سیم‌های استاندارد به عنوان هدایت‌کننده‌های الکتریکی در خطوط انتقال و یا تجهیزات نگهداری آنتن‌های رادیویی در شرایط طوفانی مورد بررسی قرار گرفته است. هرکدام از این سیم‌های بدون روکش، از چندین رشته بهم تنیده تشکیل شده است. هنگام عبور جریان باد از روی آن‌ها، نیروهای آیرودینامیکی به تکیه‌گاه فشار وارد می‌کند. مشخصات آیرودینامیکی شیارهای مارپیچ اطراف مدل‌ها، در تونل باد مورد مطالعه قرار گرفته و پروفیل‌های سرعت و اغتشاشات جریان، عدد استروهال، ضریب پسا، فرکانس گردابه‌های عبوری از کابل‌ها و پارامترهای دیگر بوسیله جریان سنج سیم داغ در اتاقک آزمون تونل باد بررسی شده است. این کابل‌ها، مانند استوانه‌ای با زبری مارپیچ عمل می‌کنند که موجب اغتشاش جریان می‌شوند و با توجه به تغییر گام و قطر رشته‌های کوچک، ارتفاع زبری، متغیر است. در این تحقیق از چهار نوع کابل: ۲۰ کیلوولت و ۶۳ کیلوولت، سیم‌نگهدارنده دکل‌ها و کابل‌روکش دار استفاده شده است که هرکدام قطر و زبری متفاوتی دارند. اغتشاش موجب می‌شود ضریب پسا در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه کمتر از ۱۷ متر بر ثانیه باشد. در این محدوده سرعت مقدار ضریب پسا در سیم ۲۰ کیلوولت کمترین مقدار را دارد.

امضای استاد راهنما

## فهرست

مقدمه.....	۱
فصل اول: جریان حول استوانه و زبری سطح	
۱-۱- جریان حول استوانه .....	۴
۲-۱- تاثیر زبری.....	۱۰
فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته	
مروری بر تحقیقات گذشته.....	۱۴
فصل سوم: تونل باد و کاربرد های آن	
۱-۳- دستگاه تونل باد.....	۳۱
۲-۳- کاربردهای تونل باد .....	۳۲
۳-۳- انواع تونل باد .....	۳۳
۴-۳- کاهش اغتشاش در تونل باد .....	۳۴
۵-۳- آیا توربولانس کم رضایت بخش است؟.....	۳۶
فصل چهارم : تونل باد و دستگاه مورد آزمایش	
۱-۴- تونل باد .....	۳۹
۲-۴- مکانیزم جابجا کننده پراب.....	۴۰
۳-۴- دستگاه جریان سنج سیم داغ .....	۴۱
۱-۳-۴- پراب سیم داغ .....	۴۲
۱-۱-۳-۴- پراب یک بعدی .....	۴۲
۲-۳-۴- سنسور سیم داغ .....	۴۳
۳-۳-۴- مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ.....	۴۴
۱-۳-۳-۴- مدارالکترونیکی جریان ثابت $CC$ .....	۴۴
۲-۳-۳-۴- مدار الکترونیکی ولتاژ ثابت $CV$ .....	۴۵
۳-۳-۳-۴- مدار الکترونیکی دما ثابت، $CT$ .....	۴۵
۴-۳-۴- تطبیق دهنده سیگنال .....	۴۶
۵-۳-۴- جمع آوری و دریافت داده ها .....	۴۷

۴۷	۱-۵-۳-۴	ارتباط از طریق کارت <b>DAQ</b> .....
۴۷	۲-۵-۳-۴	دقت تفکیک پذیر .....
۴۸	۳-۵-۳-۴	ارتباط از طریق درگاه سریال .....
۴۸	۶-۳-۴	نرم افزار .....
۴۹	۱-۶-۳-۴	تنظیم سخت افزار جریان سنج سیم داغ .....
۵۰	۲-۶-۳-۴	کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ .....
۵۰	۳-۶-۳-۴	پاسخ فرکانسی سنسور سیم داغ / فیلم داغ .....
۵۱	۷-۳-۴	اثر دما بر اندازه گیری سرعت .....
<b>فصل پنجم : معادلات حاکم</b>		
۵۳	۱-۵	معادلات حاکم بر جریان مغشوش .....
۵۵	۲-۵	ضریب پسا .....
۵۶	۱-۲-۵	روش آزمایشگاهی محاسبه ضریب پسا .....
	۲-۲-۵	محاسبه ضریب پسای یک مدل با ورود اثرات اغتشاشات جریان، به روش <b>wake-survey</b> .....
۶۰	۳-۵	عدد استروهاال .....
<b>فصل ششم : ارائه و تحلیل نتایج</b>		
۶۴	۱-۶	معرفی مدل .....
۶۵	۲-۶	نمودار سرعت متوسط و اغتشاشات و تحلیل آن ها .....
۶۵	۱-۲-۶	نسبت سرعت متوسط .....
۷۳	۲-۲-۶	<b>Velocity defect</b> .....
۷۵	۳-۲-۶	مقادیر $b_{1/2}$ .....
۷۶	۴-۲-۶	اغتشاشات جریان .....
۸۵	۵-۲-۶	ماکسیمم اغتشاشات .....
۸۶	۶-۲-۶	بررسی تجربی ضریب پسای مدل ها به روش <b>wake-survey</b> .....
۹۰	۳-۶	اعتبار سنجی پارامترها .....
۹۱	۴-۶	تعیین فرکانس گردابه توسط سنسور سیم داغ .....



۶-۴-۱- کیفیت فرکانس گردابه..... ۹۳

۶-۴-۲- رابطه سرعت و فرکانس گردابه..... ۹۶

۶-۵- اثر دیواره..... ۹۷

### فصل هفتم : نتیجه گیری

نتیجه گیری..... ۹۹

مراجع..... ۱۰۱

لیست مقالات استخراج شده از پایان نامه..... ۱۰۵

چکیده انگلیسی..... ۱۰۶

# مقدمه

## مقدمه

آیرودینامیک علمی است که عبور جریان هوا را از اطراف اجسام بررسی می کند. روش های پژوهش در این علم در سه شاخه تئوری، عددی و تجربی گسترش یافته است. روش تئوری در اکثر موارد به علت پیچیدگی تحلیل جریان هوا در اطراف اجسام، کارایی لازم را ندارد. بنابراین پژوهش ها بر روی مسائل آیرودینامیکی بیشتر متکی به روش های عددی و تجربی است.

در روش عددی با شبیه سازی جریان هوا اطراف مدل و استفاده از معادله های حاکم بر جریان هوا و با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه، جریان هوا پشت مدل مورد بررسی قرار می گیرد. اگرچه اخیرا رایانه ها رشد بسیار زیادی کرده و کاربرد روش های عددی بسیار رشد نموده است، اما برای تایید داده های عددی نیاز به استفاده از روش های تجربی است.

از آنجا که در اکثر سیستم ها رژیم جریان به صورت آشفته است بنابراین این نوع جریان از اهمیت فوق العاده ای برخوردار می باشد دلیل اهمیت آن این است که جریان آشفته نقش مهمی در انتقال اندازه حرکت (مومنتوم) انتقال جرم و حرارت و تلفات انرژی و اصطکاک در سیستمهای سیالات دارد. بنابراین به منظور طراحی بهینه و مطلوب سیستمهای سیالات در صنایع مختلف نیاز است تا جریان های آشفته را شناخته و کمیت های آن را مشخص نمود.

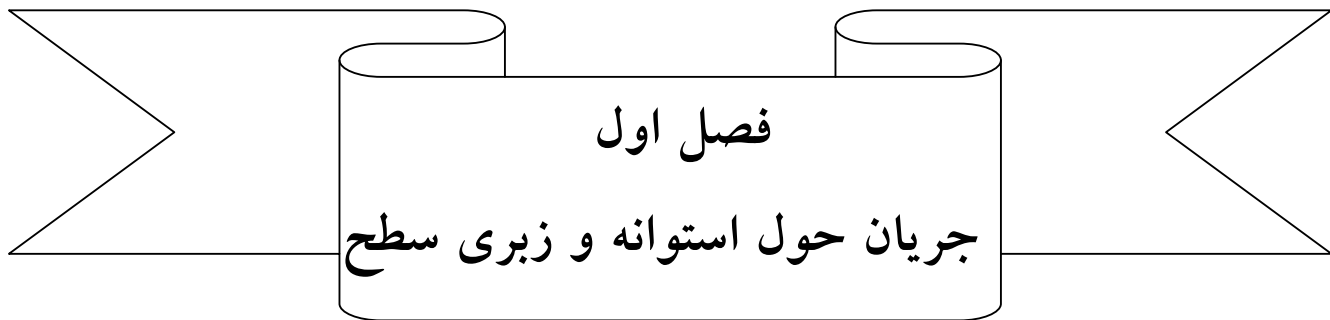
نیروی باد یکی از نیروهای قدرتمند طبیعت است که با مهار آن می توان به منبع پایان ناپذیر انرژی دست یافت. اما همین منبع با ارزش انرژی، گاه چنان قدرتی پیدا می کند که در صورت عدم پیش بینی های لازم، ممکن است خسارت های جبران ناپذیری را وارد آورد.

خطوط انتقال نیرو و اتصالاتی مانند طناب ها و نگهدارنده های آنتن های رادیویی و سایر اتصالات که بصورت هوایی قرار دارند، بطور مستقیم در معرض این نیرو قرار می گیرند. هر چند ممکن است تصور شود که قطر کابل های خطوط انتقال و اتصالات کم است، ولی طول زیاد آنها و اینکه بطور مستقیم تحت تاثیر نیروی سیال قرار می گیرند، در مجموع موجب وارد آمدن نیروی زیادی به این خطوط می شود. بعنوان مثال در مورد سیم برق ۶۳ کیلوولت اگر ضریب پسا را ۱.۲ در نظر بگیریم بر هر یک متر از این سیم در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه حدود ۶.۴ نیوتن نیرو وارد می شود.

شکل هندسی کابل ها و سیم ها و نگهدارنده ها بنابر کاربرد آنها متفاوت است و تفاوت در شکل هندسی آنها خصوصا وجود زبری های مارپیچ در آن ها موجب تغییر در ساختار دنباله و آشفستگی جریان می شود و توزیع سرعت و ضریب پسا و در نتیجه نیروهای متفاوتی را بوجود می آورد، بنابراین بررسی اغتشاشات جریان در این ناحیه اهمیت دارد.

در خطوط انتقال برق، از سیم های بدون عایق با قطرهای مختلف استفاده می شود که سیم ها در آن بصورت رشته ای دور هم و بطور مارپیچ تنیده شده اند. وجود عایق و یا سیم های تنیده شده و مارپیچ با قطرهای مختلف، هر کدام ضریب پسای مخصوص خود را دارند. در طناب ها و نگهدارنده ها نیز به همین صورت است. برای پیش بینی نیروی وارد شده به این تجهیزات، باید ضریب پسای هر کدام از آنها را در شرایط طوفانی در آزمایشگاه یافت تا بتوان با ایجاد تکیه گاه های مناسب و یا تمهیدات لازم، مانع از بروز حوادث شد .

مطالعات تجربی توسط افراد مختلفی انجام شده است که به بررسی تاثیر زبری سطح و یا نیروهای وارد بر سیم های برق پرداخته شده است. از لحاظ تئوری چنانچه یک جریان که هیچ گونه آشفستگی در ساختار خود ندارد، بر روی یک سطح بدون هیچ گونه زبری اعمال گردد، چنانچه عدد رینولدز این جریان به بینهایت هم برسد، باز جریان کماکان آرام و غیر آشفته باقی خواهد ماند. "زبری" و "آشفستگی جریان آزاد"، بسترهای پرورش آشفستگی در جریان محسوب می گردند.[1]



## ۱-۱- جریان حول استوانه :

اگر به جریان سیالی که قرار است از روی جسمی عبور کند، کمی جوهر بیافزاییم تا خطوط جریان مشخص شوند، و سپس سیال را از روی جسم عبور دهیم، بسته به هندسه جسم ممکن است جریان خارج شده از روی آن به دو صورت باشد.

اول اینکه خط جریان به همان صورت و تقریباً منظم از روی جسم عبور کند که به این اجسام، دوکی شکل گویند. به این اجسام نیروی پسای کمتری وارد می شود. ایرفویل یک نمونه از این اجسام است.

دوم اینکه هندسه جسم به شکلی باشد که در نقطه ای از آن، جریان از جسم جدا شده و خطوط جریانی که آشکارسازی شده بود، بهم بریزد که در این حالت نیروی پسای بیشتری به جسم وارد می شود.

در این اجسام، بعنوان نمونه، کره یا استوانه، حرکت سیال بصورت خط جریانی نیست!

جریان عبوری سیال را می توان به سه نوع: آرام، گذار از آرام به درهم و درهم تقسیم بندی کرد. عدد رینولدز بحرانی پارامتر بسیار مهمی است که مرز انتقال از جریان آرام به درهم را معین می کند. این عدد به میزان درهمی جریان اصلی، زبری سطح و پارامترهای دیگر بستگی دارد. بطوریکه نمی توان بدون مشخص کردن این پارامترها مقدار دقیقی برای آن مشخص کرد. بنابراین میتوان گفت زبری پارامتر مهمی برای بررسی جریان روی سطوح مختلف می باشد. زیرا باعث تغییر عدد رینولدز بحرانی می شود.

جریان عبوری از یک سیلندر ثابت با ترکیب دو جریان  $\text{uniform flow}$  و  $\text{doublet}$  بوجود می آید. بنابراین با ترکیب توابع جریان و پتانسیل می توان آنها را بصورت زیر نوشت:

$$\Psi = \Psi_{\text{uniform flow}} + \Psi_{\text{doublet}} = U r \sin\theta - K \sin\theta/r \quad (1-1)$$

$$\Phi = \Phi_{\text{uniform flow}} + \Phi_{\text{doublet}} = U r \cos\theta + K \cos\theta/r$$

از آنجاییکه خط جریانی که از نقطه سکون عبور می کند مقداری برابر صفر دارد، تابع جریان در سطح سیلندر با شعاع  $a$  بصورت زیر است.

$$\Psi = U a \sin\theta - K \sin\theta/a = 0 \quad (2-1)$$

پس قدرت  $\text{doublet}$  برابرست با:

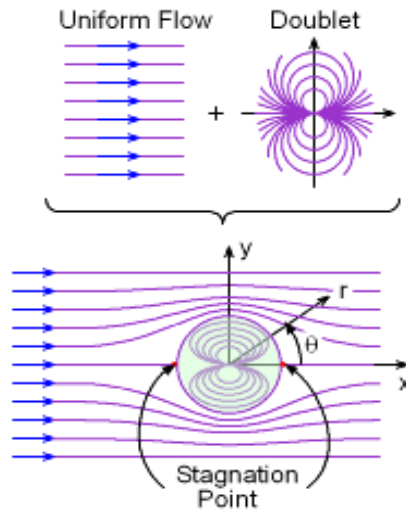
$$K = Ua^2 \quad (3-1)$$

تابع جریان و پتانسیل سرعت برای جریان عبوری از یک سیلندر ثابت برابرست با:

$$\Psi = Ur [1 - (a/r)^2] \sin\theta \quad (4-1)$$

Bluff body<sup>1</sup>

$$\Phi = Ur [1 + (a/r)^2] \cos\theta$$



شکل ۱-۱: ترکیب جریان یکنواخت و دوقطبی

بنابراین ترکیبات سرعت به صورت رابطه زیر نوشته می شود: (۵-۱)

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = U \left[ 1 - \left( \frac{a}{r} \right)^2 \right] \cos\theta$$

$$v_\theta = -\frac{\partial \Psi}{\partial r} = -U \left[ 1 + \left( \frac{a}{r} \right)^2 \right] \sin\theta$$

در روی سیلندر  $r=a$  سرعت برابرست با:

$$v_r = 0 \quad (6-1)$$

$$v_\theta = -2U \sin\theta$$

میزان سرعت شعاعی در طول سیلندر صفر است. در حالیکه میزان سرعت مماسی از صفر در نقطه سکون ( $\theta = \pi$ ) تا ماکزیمم مقدار  $2U$  در بالای سیلندر ( $\theta = \pi/2$  or  $-\pi/2$ ) تغییر میکند.

توزیع فشار در طول سیلندر با استفاده از قانون برنولی به صورت زیر است:

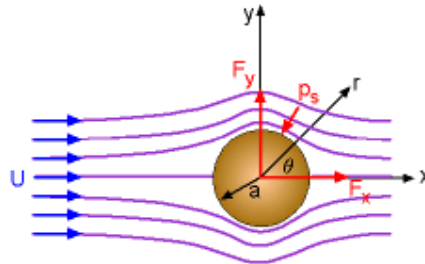
$$p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2 = p_s + \frac{1}{2} \rho v_{\theta s}^2 \quad (7-1)$$

اندیس 0 برای جریان بالای سیلندر و اندیس S برای جریان روی سیلندر در نظر گرفته شده است. تغییر ارتفاع ناچیز است و در نظر نمیگیریم، با جایگذاری پارامترها در معادله برنولی:

$$C_p = \frac{p_s - p_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} = 1 - 4 \sin^2 \theta \quad (8-1)$$

نیروی پسا و لیفت وارد شده به سیلندر از انتگرالگیری از فشار روی سیلندر بوجود می آید. (۹-۱)

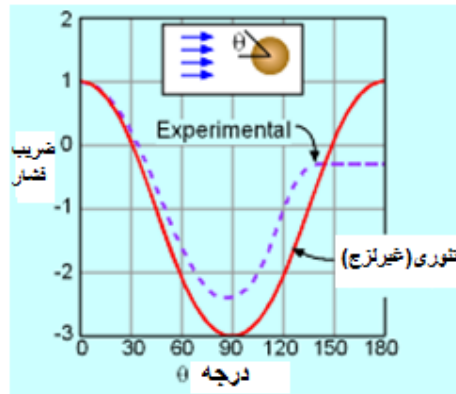
$$\begin{aligned}
 F_x &= -\int_0^{2\pi} p_s \cos \theta a d\theta \\
 &= -\int_0^{2\pi} \left[ p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2 (1 - 4 \sin^2 \theta) \right] \cos \theta a d\theta \\
 &= 0
 \end{aligned}$$



شکل 1-2: نیروهای وارد بر سیلندر

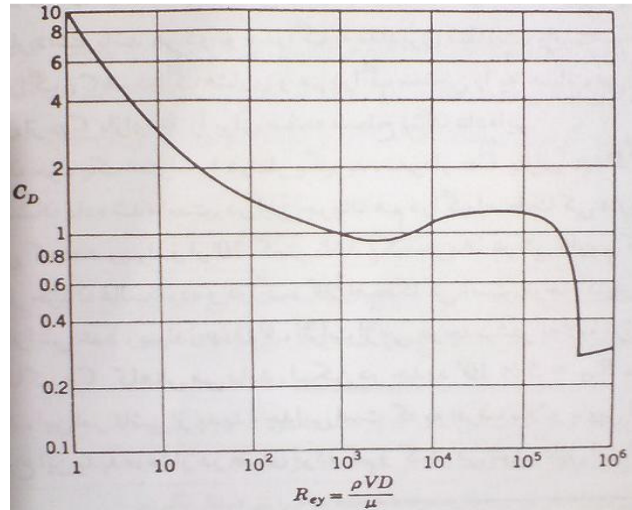
$$\begin{aligned}
 F_y &= -\int_0^{2\pi} p_s \sin \theta a d\theta & (10-1) \\
 &= -\int_0^{2\pi} \left[ p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2 (1 - 4 \sin^2 \theta) \right] \sin \theta a d\theta \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

مباحث مطرح شده در بالا برای جریان بدون ویسکوز معتبر است. در حالیکه میدانیم جریان واقعی ویسکوز است و جدایش در این جریان اتفاق می افتد و باعث می شود نیروی پسا برابر صفر نشود. در ابتدای برخورد ذرات سیال با مدل، ذرات به جسم چسبیده و ذرات بعدی خط جریان هایی همانند هندسه شکل پیدا می کنند. تا رسیدن ذرات به محل جدایش، لایه مرزی به سرعت رشد کرده و بعد از آن، به دلیل تغییر در هندسه جسم، سیال از سطح جسم جدا شده و در پشت مدل جریان گردابی به وجود می آید.



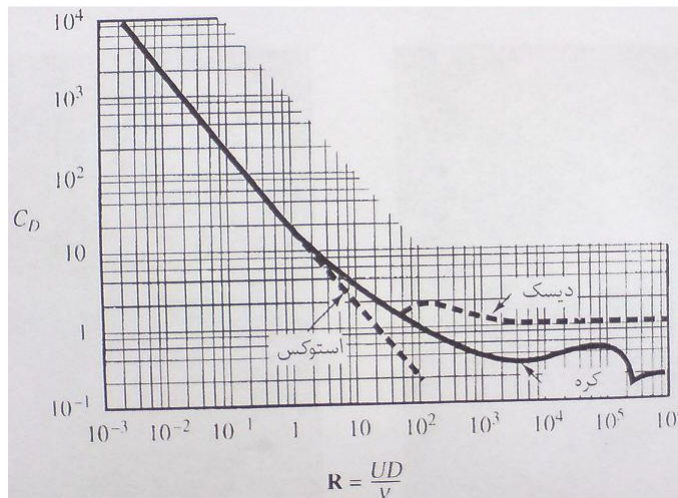
شکل 1-3: تفاوت تئوری و آزمایش

حال به بررسی حالت واقعی جریان هوا سیلندر ثابت می پردازیم:  
 نمودار  $C_d$  (ضریب درگ) به ازای رینولدزهای مختلف و با یک زبری مشخص در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴: جریان حول سیلندر

یا در حالتی مشابه برای کره داریم:



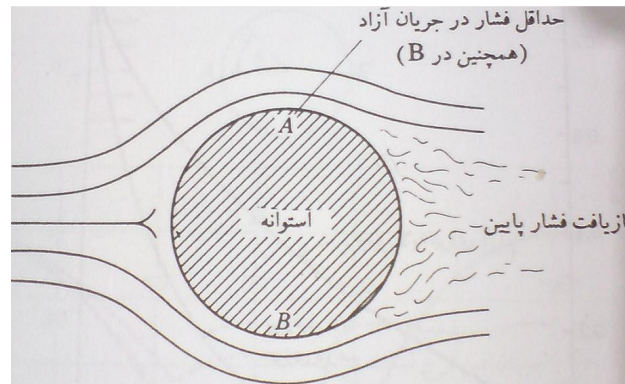
شکل ۱-۵: جریان حول کره

در مورد یک زبری خاص (میتوان این حالت را برای تمام زبری ها با کمی تغییر عدد رینولدز تعیم داد) در حدود  $Re=5000$  ضریب درگ  $C_d$  شروع به افزایش می کند. این امر ناشی از پدیده جدایی است که به طرف بالا و پایین استوانه حرکت می کند. با وقوع این پدیده، فشار در فضای مرده کم و کمتر میشود. دلیل این امر آن است که هر چه به بالا و پایین استوانه



نزدیکتر می شویم، سرعت جریان اصلی بیشتر می شود و نتیجتاً طبق معادله برنولی فشار جریان اصلی کم و کمتر میشود.

از اینرو هنگامیکه در آغاز جدایی به بالا و پایین استوانه نزدیکتر می شود، با توجه به اینکه در فضای مرده بازیافت فشار کم است، در پشت استوانه فشار کمتری ایجاد شده و در نتیجه درگ بیشتر خواهد شد.

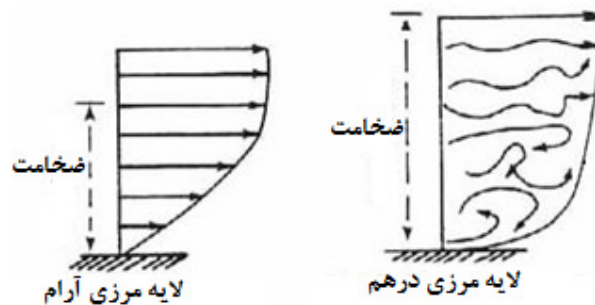


شکل 6-1

در اعداد رینولدز بالاتر بین  $10^5$  و  $10^6$ ، منحنی بطور ناگهانی سقوط می کند که میتوان آنرا بطور کیفی شرح داد.

در اعداد رینولدز کمتر از این سقوط ناگهانی، جدایی که در پایین دست استوانه رخ می دهد جدایی در لایه مرزی آرام است. با افزایش عدد رینولدز جریان اصلی در هر مقدار معین  $X$  عدد رینولدز در لایه مرزی نیز افزایش می یابد. آنگاه قبل از وقوع جدایی، لایه مرزی آرام تحت انتقالی به لایه مرزی درهم قرار می گیرد.

یکی از اختلاف های مهم لایه مرزی آرام و درهم این است که پروفیل سرعت در لایه مرزی درهم بسیار تخت تر است.



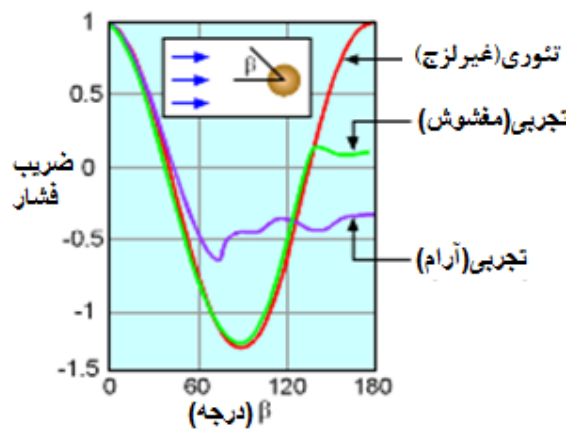
شکل ۷-۱

یعنی به ازای سرعت جریان آزاد یکسان و ضخامت  $\delta$  یکسان، مومنتوم لایه مرزی درهم به میزان قابل ملاحظه ای بیش از لایه مرزی آرام است. و به این دلیل جریان لایه مرزی درهم می تواند بیش از جریان لایه مرزی آرام، قبل از وقوع احتمال جدایی گردان فشار معکوس را تحمل کند. لذا هنگامیکه در لایه مرزی حول استوانه انتقالی از آرام به درهم رخ می دهد، نقطه جدایی دفعتا به نقطه ای جلوتر در پایین دست سطح استوانه منتقل شده و باعث می شود درگ و ضریب درگ بطور قابل ملاحظه ای کاهش یابد. بنابراین آنچه سبب می شود، که ضریب درگ در منحنی فوق دفعتا سقوط کند، انتقال است.

این نکته مهم را باید مورد توجه قرار داد که وقتی عدد رینولدز از مقدار بحرانی بیشتر شود جدایی دوباره به سمت A و B حرکت می کند و ضریب درگ دوباره افزایش می یابد.

تحلیل عددی جریان در رینولدز فوق بحرانی توسط اسکویر<sup>۲</sup> و همکارانش انجام شده است. [5] در شکل ۸-۱ سه توزیع فشار حول یک استوانه نشان داده شده است: یک منحنی برای جریان غیر لزج که تئوریک است. یک منحنی که مادون بحرانی (آرام) نامیده می شود و دارای یک جدایی است که در لایه مرزی آرام رخ می دهد و منحنی دیگر که فوق بحرانی (درهم) نامیده میشود و دارای یک جدایی است که در لایه مرزی درهم ایجاد شده است.

در جریان درهم جدایی نسبت به آرام دیرتر اتفاق می افتد و فشار پشت بیشتر است که نتیجه آن کاهش درگ پس از عدد رینولدز بحرانی است.



شکل ۸-۱: توزیع فشار حول استوانه

پس بطور خلاصه میتوان گفت: اگر جریان آرام باشد و ما  $Re$  را افزایش دهیم طوری که باز آرام بماند، در واقع ضریب درگ را افزایش داده ایم.

حال اگر  $Re$  را افزایش دهیم طوریکه جریان قبل از رسیدن به نقطه جدایی درهم شود، ناگهان ضریب درگ افت شدیدی می کند. این همان دلیل اصلی کاهش درگ است یعنی انتقال. اگر باز هم  $Re$  را افزایش دهیم (افزایش  $Re$  در جریان درهم) ضریب درگ به تدریج دوباره افزایش می یابد ولی روشن است که تاثیر کاهش درگ توسط انتقال آنقدر زیاد بوده که این افزایش درگ نسبت به آن کاهش قابل ملاحظه نیست.

## ۲-۱- تاثیر زبری:

از لحاظ تئوری چنانچه یک جریان که هیچ گونه آشفتگی در ساختار خود ندارد، بر روی یک سطح بدون هیچ گونه زبری اعمال گردد، اگر عدد رینولدز این جریان به بینهایت هم برسد، باز جریان کماکان آرام و غیر آشفتنه باقی خواهد ماند. زبری و آشفتگی جریان، بستر پرورش آشفتگی در جریان محسوب می گردد.

میزان اثر زبری سطوح بر روی جریان سیال، وابسته به اندازه نسبی عناصر زبری در مقایسه با طول مقیاس لزوج جریان دارد. اثر زبری می تواند از اثرات بی اهمیت برای زبری های ناچیز، تا اثرات قابل توجه و کاملاً موثر برای زبری های با طول مقیاس بزرگ متفاوت باشد. اثر زبری سطح، افزایش مقاومت در مقابل جریان است. این امر منجر به افزایش نرخ مومنتوم، گرما و جرم از طریق دیواره می شود.

تحقیقات سیستماتیک اولیه در مورد اثر زبری سطح، ابتدا توسط نیکورادزه مطرح شد. وی تحقیقات گسترده ای را بر روی جریان درون لوله های زیر انجام داد. وی برای این منظور درون لوله ها را با ماسه هایی با دانه بندی یکنواخت پوشانده بود. زبری نسبی دانه های ماسه می تواند در طیف وسیعی از اندازه ها و با توجه به انتخاب اقطار مختلف برای لوله و نیز اندازه های مختلف دانه های ماسه قرار گیرد. چنانچه اندازه دانه ماسه را با  $y_s^+$  نمایش دهیم، و عدد رینولدز زبری را بصورت زیر نمایش دهیم، خواهیم داشت: [1]

(۱۱-۱)

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad y_s^+ = \frac{\rho u^* y_s}{\mu}$$

$$0 < y_s^+ < 5 \quad \text{سطح صاف است.}$$

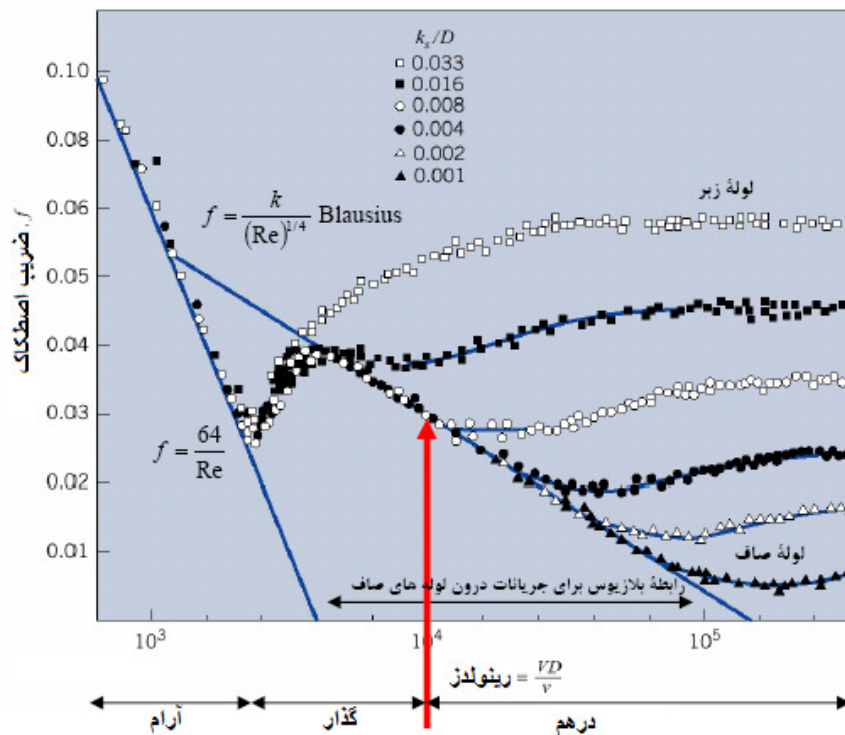
$$5 < y_s^+ < 70 \quad \text{سطح نیمه صاف است.}$$

$$y_s^+ > 70 \quad \text{سطح زبر است.}$$

این سه رژیم بطور تقریبی متناظر با سه لایه درون لایه مرزی می باشند. تا مادامیکه المان های زبری بطور کامل در درون زیر لایه لزج قرار دارند،  $(k_s < 5\delta_v)$  تفاوتی با سطح صیقلی ایده آل وجود ندارد. اما اگر المان های زبری بزرگتر از ضخامت زیرلایه لزج باشند، اثر زبری آغاز می شود. اگر المان های زبری به درون لایه همپوشانی وارد شوند، به عبارت دیگر کل لایه نزدیک دیوار را بپوشانند، اثرات لزجت از بین خواهند رفت. در این حالت رژیم کاملا زبر برقرار است که در آن، جریان مستقل از عدد رینولدز خواهد بود.

به عبارت دیگر در یک جریان سیال در نواحی بسیار نزدیک به دیواره که بواسطه پایین بودن عدد رینولدز موضعی، جریان کاملا آرام می باشد، چنانچه به هر طریق اغتشاشی در این لایه ایجاد گردد، اغتشاش مزبور بواسطه بالا بودن نیروهای لزجت، سریعاً میرا شده و جریان کماکان حالت آرام خود را حفظ می نماید، یعنی پایین بودن عدد رینولدز به معنای قویتر بودن نیروهای میرا کننده لزجت در مقابل نیروهای ضعیفتر اینرسی می باشد و بالعکس.

همانطور که گفته شد نیکورادزه ارزشمندی مفهوم زبری نسبی را با آزمایشات خود روی لوله های زبر شده مصنوعی، اثبات کرد. این آزمایشات نشان می دهند که برای یک مقدار زبری، منحنی رینولدز و ضریب اصطکاک به سهولت بدون توجه به قطر واقعی لوله ها ترسیم می شود.



شکل ۹-۱: نمودار نیکورادزه