



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

زمان پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰

## رابطه بین لایه مرزی با جریان سیال اطراف جسم

محمد افتخاری یزدی<sup>۱</sup>، مجید عباسی<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه آزاد تهران مرکز

moh.eftekhari-yazdi@iauctb.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد مکانیک تبدیل انرژی

majid.abbasi66@gmail.com

### چکیده:

در این تحقیق، در ابتدا برخی از مفاهیم مربوط به لایه مرزی و پس از آن به بررسی نیروهای وارد بر اجسام در حین عبور سیال از اطراف آنها، یعنی نیروی پسا پرداخته شده است. یک لایه بسیار نازک که به جسم متصل است (لایه مرزی) و در آن لزجت دارای اهمیت است، و بقیه جریان که در آن می توان از لزجت صرف نظر کرد. بلکه با کاهش فراوان پیچیدگی ریاضی مسئله، مسیری برای بررسی تئوریک جریان های لزج نشان داده شد. تحقیقات تئوری با آزمایشات ساده ای در یک کانال آب ساخته بود، پشتیبانی می کرد تا انسجام بین تئوری و آزمایش را مجدداً برقرار شود. تئوری "لایه مرزی" یا "لایه اصطحاک" پراوندل، استفاده فراوانی پیدا کرد و سبب شد در آغاز این قرن تحقیقات فراوانی بر روی مکانیک سیالات صورت گیرد. با پیشرفت تئوری های مربوط به پرواز، تئوری جدیدی نیز- تئوری ایرفویل و دینامیک گاز- گسترش پیدا کرد و یکی از ستون های اصلی مکانیک سیالات مدرن شد

کلمات کلیدی:

لایه مرزی، جریان سیال، لایه اصطحاک



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

## مقدمه:

نیروی مقاوم را نیز زمانی می توان بهتر درک کرد که به این مسئله توجه کنیم که مساله کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت اجسام داخل یک سیال، و در نتیجه، امکان دستیابی به سرعت های بالاتر و نیز کاهش مصرف سوخت، یا منابع مورد نیاز انرژی برای حرکت جسم، از دیر باز مورد توجه دانشمندان و محققان بوده است. از سوی دیگر کاهش نیروی مقاوم یا درگ، علاوه بر موارد فوق، امکان طی مسافتهای بیشتر به ازای دفعات کمتر سوخت گیری، میزان آلودگی کمتر محیط، همچنین بالا رفتن عمر کارکرد تجهیزات را بهبود بخشیده است. امروزه این زمینه تحقیقاتی که در کاهش سوخت، افزایش سرعت متحرک و پاکیزگی محیط زیست موثر است، رو به گسترش می باشد.

پراندل (L. Prandtl 1904) در سخنرانی خود با عنوان " حرکت سیال تحت تاثیر اصطحکاک های بسیار اندک " در کنگره ریاضی هایدلبرگ، نشان داد که چگونه می توان برای در نظر گرفتن نتایج تحقیقات عملی، از یک روش تئوریک برای جریان های لزج استفاده کرد. پراندل با بکارگیری ملاحظات تئوریک به همراه نتایج بعضی از آزمایشات، نشان داد که جریان عبور کننده از روی یک جسم را می توان به دو قسمت تقسیم کرد:

یک لایه بسیار نازک که به جسم متصل است ( لایه مرزی ) و در آن لزجت دارای اهمیت است، و بقیه جریان که در آن می توان از لزجت صرف نظر کرد. با ارائه این ایده، نه تنها یک توضیح فیزیکی برای نشان دادن اهمیت لزجت در نیروی پسا ارائه شد، بلکه با کاهش فراوان پیچیدگی ریاضی مسئله، مسیری برای بررسی تئوریک جریان های لزج نشان داده شد. او تحقیقات تئوری خود را با آزمایشات ساده ای در یک کانال آب که ساخته خود او بود، پشتیبانی می کرد تا انسجام بین تئوری و آزمایش را مجدداً برقرار کند. تئوری "لایه مرزی" یا "لایه اصطحکاک" پراندل، استفاده فراوانی پیدا کرد و سبب شد در آغاز این قرن تحقیقات فراوانی بر روی مکانیک سیالات صورت گیرد. با پیشرفت تئوری های مربوط به پرواز، تئوری جدیدی نیز- تئوری ایرفویل و دینامیک گاز- گسترش پیدا کرد و یکی از ستون های اصلی مکانیک سیالات مدرن شد.

## مفهوم لایه مرزی

جریانهای سیالاتی با مقادیر کوچک لزجت و در نتیجه عدد های رینولدز بسیار بالا، کاربردهای عملی فراوانی دارند. همانطور که می دانیم حل حدی  $Re = \infty$  در معادلات جریان غالباً تقریب خوبی است. یک مشکل اساسی در این حل های حدی آن است که شرط عدم لغزش را ارضاء نمی کنند، یعنی در این حل ها سرعت بر روی دیوار صفر نبوده و یک عدد محدود است. برای ارضاء کردن شرط عدم لغزش می بایست لزجت را نیز در نظر بگیریم. این کار سبب می شود که سرعت از یک مقدار محدود حاصل از حل حدی در نزدیکی دیوار به مقدار صفر دقیقاً بر روی دیوار منجر شود. در عدد های رینولدز بالا، این تحول در لایه نازک در نزدیکی دیوار رخ می دهد که توسط پراندل (L. Prandtl 1904)، "لایه مرزی" یا "لایه اصطحکاک" نامیده شد. با افزایش عدد رینولدز یعنی کاهش



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

لزجت ، لایه مرزی نازک تر خواهد شد . از این رو مفهوم لایه مرزی به این نتیجه منجر می شود که در عدد های رینولدز بالا ، جریان را می توان به دو ناحیه متفاوت تقسیم کرد . در ناحیه بزرگتر جریان ، می توان از لزجت صرفنظر کرد و در نتیجه حل حدی غیرلزج معتبر است . این قسمت ، جریان خارجی غیر لزج نامیده می شود . ناحیه دیگر ، لایه مرزی بسیار نازکی در نزدیکی دیوار است که درون آن ، لزجت می بایست در نظر گرفته شود . در درون لایه مرزی امکان وجود هر دو نوع رژیم جریان یعنی لایه ای و مغشوش وجود دارد . از این رو می توان به بررسی لایه مرزی لایه ای یا لایه مرزی مغشوش پرداخت .

تقسیم میدان جریان به جریان غیر لزج خارجی و لایه مرزی ، سبب ساده سازی های قابل توجهی در تئوری جریان های دارای عدد رینولدز بالا می شود . در واقع تنها با استفاده از این ایده پرانندل است که می توان نتایج تئوری برای این جریان ها بدست آورد .

## مفهوم جریان های آرام (لایه ای) و درهم

ابتدا باید ببینیم که چه چیزی تنش های برشی شناخته شده و پذیرفته شده جریان آرام را به وجود می آورد . در جریان آرام ، حرکتی داریم که از دیدگاه ماکروسکوپی به صورت یک جریان منظم دیده می شود . حرکات مولکولی تصادفی در این جریان مشابه حرکات تصادفی ماکروسکوپی توده های سیال در جریان درهم است . یعنی در جریان آرام می توانیم تصور کنیم که حرکت منظمی از مولکولها داریم که به آن یک حرکت تصادفی اضافه شده است . در نتیجه این نوسانات ، یک مولکول می تواند از یک ناحیه جریان که از نظر ماکروسکوپی پر سرعت است به داخل یک ناحیه جریان که از نظر ماکروسکوپی کم سرعت است رانده شود . در نتیجه برخورد های مولکولی ، تبادل ممنتوم صورت می گیرد و حرکت مولکولهای سریع ، کند شده ، در حالی که حرکت مولکولهای کم سرعت تند می شود . به طرز مشابهی مولکولهایی که از ناحیه کم سرعت به ناحیه پر سرعت رانده می شوند باعث کند شدن جریان در ناحیه سریع می گردند .

ملاحظه می کنیم که این حرکت تصادفی مولکولها نسبت به الگوی منظم جریان باعث ایجاد تمایلی در جهت یکنواخت شدن پروفیل سرعت کلی می شود . این کنش و اثرات برخورد مولکولی ، کنش هایی میکروسکوپی هستند که از نظر ماکروسکوپی به صورت تنش برشی نمود می یابند . بعلاوه ، رابطه بین تنش برشی و میدان سرعت موجب می شود که خاصیت لزجت سیال مطرح گردد .

در جریان درهم توده های ماکروسکوپی سیال را داریم که دارای یک سرعت نوسانی تصادفی افزوده شده بر جریان متوسط زمانی درهم هستند . بنابراین بین کنش مولکولی که در بالا توصیف شد و کنش درهمی المان های سیال در جریان درهم مشابهتی وجود دارد . در نوع اول ( آرام ) ، کنش میکروسکوپی مولکولها باعث ایجاد تنش هایی ماکروسکوپی و مطرح شدن ویسکوزیته می شوند . نوع دوم ( درهم ) را می توانیم یک کنش ماکروسکوپی در نظر بگیریم که خود را به صورت تاثیری که یک مرتبه از اثر ماکروسکوپی کلی تر است ، متظاهر می کند و این تاثیر همان جریان متوسط زمانی است که ما آن را تنش ظاهری می نامیم .



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

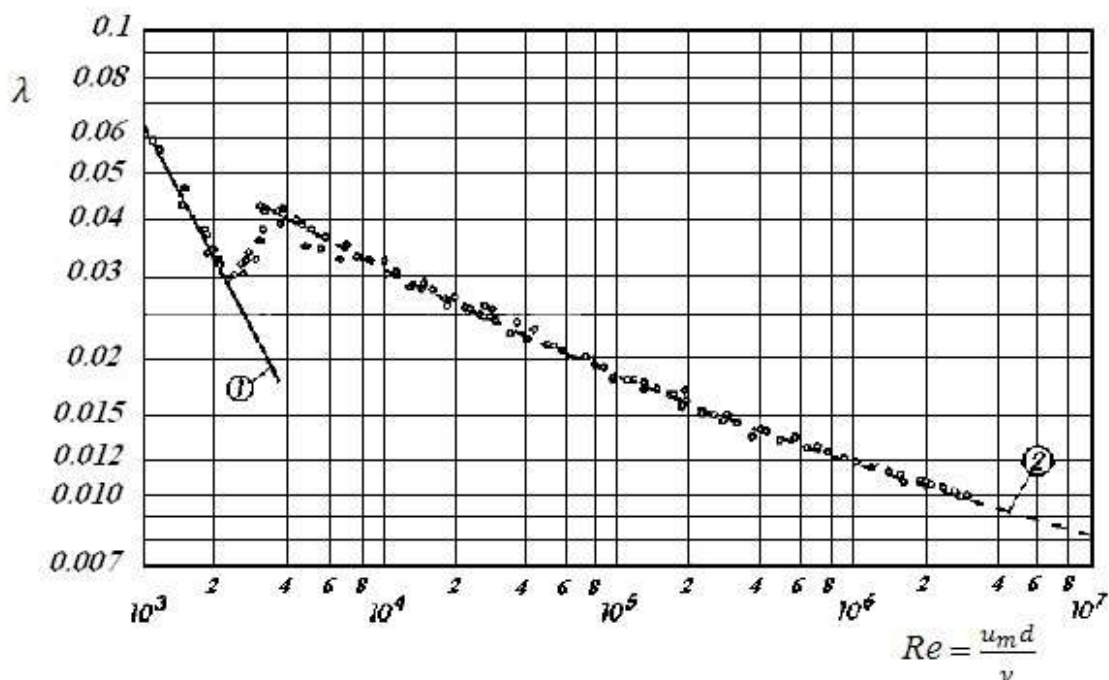


بنابراین مفهوم تنش ظاهری ، هنگامی که بر مبنای این تعمیم به آن بیاندهشیم ، مفهومی ساختگی نیست . بعلاوه ، می توان برای ارتباط دادن تنش ظاهری با میدان سرعت متوسط کوشش نمود و در انجام این کار یک خاصیت متوسط زمانی همانند خاصیت ماکروسکوپیک ویسکوزیته ارائه می شود .

این خاصیت متوسط زمانی ویسکوزیته گردابی ( Turbulant Viscosity ) نامیده می شود . واضح است که اگر تنش های ظاهری بتوانند از طریق ویسکوزیته گردابی به میدان سرعت های متوسط مرتبط شوند می بینیم که تعداد مجهولات معادلات ناویر- استوکس کاهش می یابد . در این مرحله است که محققین می توانند روابطی نظری بین این کمیات ساده اعلام کنند که در موارد محدودی به نتایج با مفهومی می انجامد . تئوری طول تداخل یکی از مهمترین مثال ها در این مقوله است . در اینجا به بیان نمونه ای می پردازیم که به درک بهتر رفتار و ساختار جریان سیال در اثر لایه ای یا درهم بودن جریان کمک می کند :

جریان های داخلی (جریان های داخل لوله ها ، دیفیوزر ها و . . . ) نیز توسط ضرایب بدون بعد بررسی می شوند برای مثال برای جریان داخل لوله های مدور که در آنها  $x$  در جهت جریان در نظر گرفته می شود ،

که بر اساس قطر لوله  $d$  و سرعت متوسط نوشته می شود . تابع  $(x)$  در آزمایشات مختلف مورد تحقیق قرار گرفته است و در شکل نشان داده شده است :





# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



شکل فاکتور اصطکاک برای لوله های صیقلی ، تنها به عدد رینولدز وابسته است . اندازه گیریها توسط افراد مختلفی صورت گرفته است.

- دو ناحیه کاملاً مجزا دیده می شود و باید توجه داشت که هر دو محور افقی وعمودی لگاریتمی می باشند . در عددهای رینولدز پایین ، با افزایش  $Re$  بر روی یک خط مستقیم کاهش می یابد . در عدد رینولدز بحرانی  $0032 =$  این کاهش به صورت ناگهانی و یک افزایش سریع در دیده می شود . بعد از آن با افزایش  $Re$  دوباره کاهش می یابد ، اما نه با همان سرعت قبل و نه روی یک خط مستقیم .

اختلاف رفتار منحنی ( $Re$ ) در  $Re <$  و  $Re >$  به علت این واقعیت است که در این دو ناحیه، دو نوع مختلف جریان وجود دارد. این اطلاعات توسط رینولدز (O. Reynolds 1883) بدست آمده است که در آزمایش خط رنگی خود ، این دو نوع مختلف جریان را نشان داد شکل را ببینید .



آزمایش خط رنگی رینولدز ( O. Reynolds 1883 ) . جریان درون آب با القای خط رنگی قابل مشاهده است ، ارائه شده توسط دویس ( W. Dubs 1939 )

$Re = 2520$  ، جریان مغشوش  $Re = 1150$  . ( b ) ، جریان لایه ای ( a )

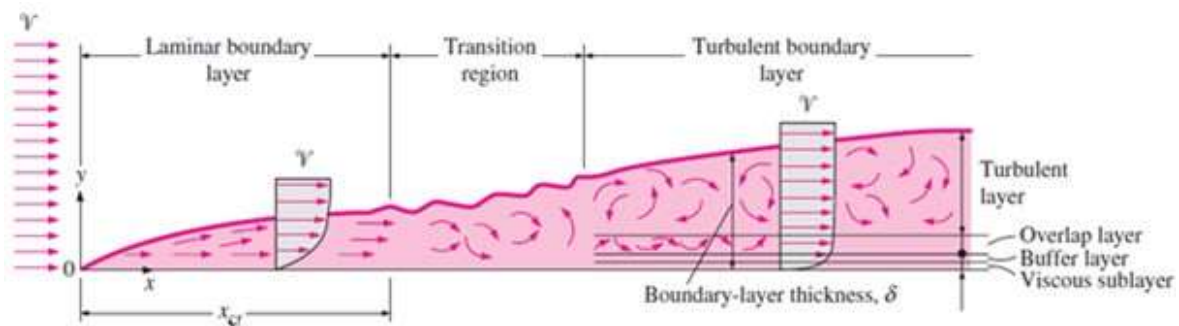
در شکل 1-3- جریان لایه مرزی روی صفحه مسطح را به لحاظ کیفی مورد بررسی قرار داده ایم. همانطور که در شکل دیده می شود یک ناحیه آرام از لبه صفحه شروع شده و ضخامت آن مرتباً زیاد می شود ، سپس به ناحیه انتقال می رسیم که در طی آن جریان به درهم تبدیل شده و همچنان ضخامت لایه مرزی افزایش می یابد . انتقال در اعداد رینولدز بین  $10 \times 3$  تا  $10$  رخ می دهد . در ناحیه درهم می بینیم که همانند جریان درهم در لوله ها، با نزدیک شدن به دیواره اثرات درهمی بقدری کم می شوند که اثرات لزجی غالب شده و ما را بر آن می دارند که مفهوم زیرلایه لزج (Viscous Sublayer) را ارائه کنیم.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



در جریان درهم، لایه خیلی نازک در کنار دیواره که در آن اثرات لزجی غالب هستند را زیرلایه لزج گویند. پروفیل سرعت در این لایه خیلی نزدیک به خطی است. بعد از آن لایه میانگیر (Buffer layer)، که در آن اثرات توربولانت دارند مهم می شوند اما هنوز اثرات ویسکوز غالب هستند، قرار دارد. بالای این لایه، لایه همپوشانی (Overlap layer) قرار دارد که در آن اثرات توربولانت خیلی مهمتر شده اند اما هنوز اثرات ویسکوز غالب هستند. بالای این لایه، لایه توربولانت است که در آن اثرات توربولانت بر اثرات ویسکوز غالب هستند. [12]



توسعه لایه مرزی بر روی یک صفحه تخت و رژیم های مختلف جریان .

خلاصه روابط برای صفحه ای با زاویه حمله صفر :

با توجه به این که برای صفحه ای با زاویه حمله صفر می توان ضخامت لایه مرزی را به صورت  $\delta$

$$0 \approx 5 \sqrt{\nu x} \quad \text{تعریف نمود ، داریم :}$$

$$* = 0.34 \delta$$

$$= 0.13 \delta$$

$$= 0.20 \delta$$



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

## 6-1 معادلات لایه مرزی

برای بدست آوردن معادلات لایه مرزی ، از روش پرانندل استفاده می کنیم که در آن مرتبه بزرگی ترم های ظاهر شده در معادلات ممننوم با یکدیگر مقایسه شده و ترم های کوچکتر حذف می شوند . در جریان دائم ، دو بعدی و غیر قابل تراکم یک سیال لزج ، معادلات حاکم ( شامل معادلات نویر استوکس ومعادله پیوستگی ) بصورت زیر می باشند :

$$\begin{aligned} \text{x-momentum : } \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) & 19-1 \\ \text{y-momentum : } \rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) & 20-1 \\ \text{continuity : } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 & 21-1 \end{aligned}$$

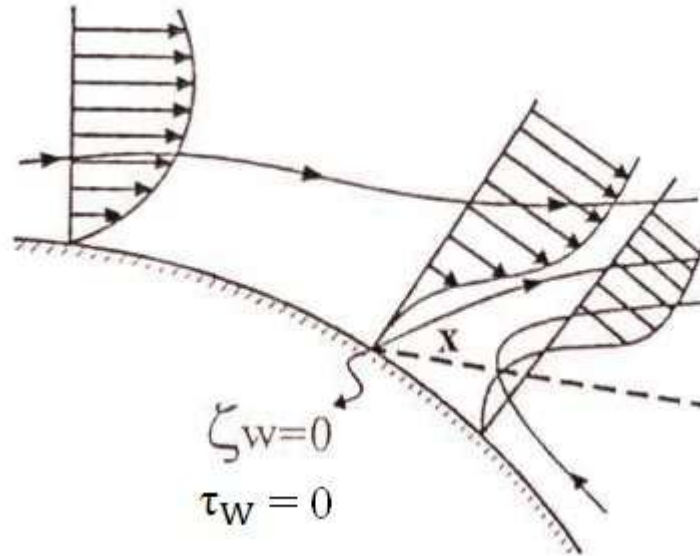
فرض می کنیم که A نقطه ای دلخواه در داخل لایه مرزی با مختصات  $x, y$  باشد . اگر ضخامت لایه مرزی را با  $\delta$  و طول را با  $L$  نشان دهیم بدیهی است که  $x$  از مرتبه  $L$  است در حالیکه  $y$  از مرتبه  $\delta$  خواهد بود . حال اگر فرض کنیم که لایه مرزی بسیار نازک است در این صورت  $\delta \ll x$  خواهد بود و در نتیجه می توان نتیجه گرفت که گرادیان سرعت در جهت  $y$  خیلی شدیدتر از گرادیان سرعت در جهت  $x$  است .

## پدیده جدایی لایه های مرزی

در مورد اجسام ضخیم همچون ایرفویل ، استوانه ، کره و همچنین در مورد وسایلی همچون دیفیوزر با این واقعیت مواجه می گردیم که تحت شرایط خاصی جریان در لایه مرزی معکوس می گردد ( Back flow ) که به این پدیده اصطلاحاً پدیده جدایی ( Separation ) اطلاق می گردد . شکل زیر این پدیده را به خوبی نشان می دهد :



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

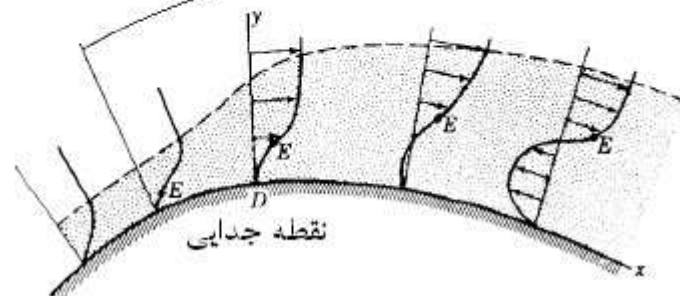


شروع جدایش

سوالی که در اینجا مطرح می گردد این است که این پدیده تحت چه شرایطی اتفاق می افتد و از چه اهمیتی در یک لایه مرزی برخوردار است . نگاهی مجدد به این شکل حاکی از آن است که در هنگام معکوس شدن جریان و وقوع پدیده جدایی بی تردید پروفیل سرعت دارای نقطه عطف می گردد . بنابراین برای پاسخ به این سؤال که تحت چه شرایطی جدایی اتفاق می افتد کافی است بررسی نماییم که تحت چه شرایطی پروفیل سرعت دارای نقطه عطف است .

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0} = 0$$

گرادیان فشار معکوس



نقطه جدایی





# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

## جدایش و معکوس شدن پروفیل جریان .

لازم به ذکر است که گرادیان فشار مثبت بر خلاف گرادیان فشار منفی منجر به افزایش ضخامت لایه مرزی (نسبت به حالتی که گرادیان فشار وجود ندارد) می شود . در ضمن همگامی که پدیده جدایی اتفاق می افتد لایه مرزی به قدری ضخیم می گردد که فرض اساسی نازک بودن لایه مزبور مخدوش می گردد و در نتیجه بعد از نقطه شروع جدایی مجاز به استفاده از تئوری لایه مرزی برای محاسبه تنش برشی در دیواره نمی باشیم . البته در مورد نقاطی که قبل از نقطه جدایی قرار دارند استفاده از تئوری لایه مرزی برای محاسبه تنش برشی همچنان مجاز می باشد با اینوصف باید توجه نمود که وقوع پدیده جدایی موجب تغییرات اساسی در میدان فشار در خارج لایه مرزی می گردد و این بدان معناست که مجاز به استفاده از میدان فشار قبلی در معادلات لایه مرزی نمی باشیم و لازم است میدان فشار در خارج از لایه مرزی مجدداً محاسبه و یا اندازه گیری شود .

## - میدان جریان روی اجسام و مفهوم لایه مرزی

مشخصه میدان جریان تابعی از شکل جسم است. هر چقدر هندسه سطح ساده تر باشد (مانند کره و استوانه) پیچیدگی های میدان جریان نیز کمتر است. طبیعت جریان روی اجسام به شدت وابسته به مقدار عدد رینولدز است که آیا  $Re < 1$  است و یا  $Re > 1$  می باشد. در جریان های خارجی که اندازه جسم متوسط است و طول مشخصه در حدود  $0.01m < l < 10m$  می باشد، و سرعت بالادست نیز حدود  $0.01m/s < U < 100m/s$  بوده و سیال نیز دارای ویسکوزیته زیادی نیست (مانند هوا و آب)، عدد رینولدز حدود  $10 < Re < 10^9$  می باشد. و لذا اینرسی غالب است. طبق قانون سرانگشتی در جریان های با  $Re > 100$ ، اثرات اینرسی غالب است و برای  $Re < 1$ ، اثرات ویسکوزیته غالب می باشد.

به عنوان مثال در ته نشینی آرام آلودگی در دریاچه ها، به دلیل قطر کوچک ذرات و سرعت پایین ته نشینی، عدد رینولدز کوچک است و اثرات ویسکوزیته غالب است. همچنین برای اجسامی که درون نفت با ویسکوزیته بالا حرکت می کنند، به دلیل بزرگ بودن  $\mu$ ، عدد رینولدز کوچک است.

در سال ۱۹۰۴، پرانت مفهوم لایه مرزی را بیان کرد و به این وسیله ارتباط مهمی میان جریان سیال ایده آل و جریان سیال واقعی به وجود آمد. برای سیالاتی که ویسکوزیته نسبتاً کمی دارند، اثر اصطکاک داخلی در سیال تنها در ناحیه باریکی از محیط که مرز سیال را تشکیل می دهد، قابل توجه است و لذا خارج از این ناحیه باریک در نزدیکی مرزهای جامد، باید جریان را ایده آل در نظر گرفت. روابط موجود در ناحیه لایه مرزی را می توان از معادلات کلی برای سیالات ویسکوز محاسبه کرد ولی استفاده از معادله مومنتم امکان یافتن



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

معادلات تقریبی جهت رشد لایه مرزی و نیروی درگ را فراهم می‌سازد. در ادامه لایه مرزی تشریح خواهد شد و معادله مومنتم لایه مرزی در جریان آرام به دست می‌آید. پدیده جدایش لایه مرزی و شکل‌گیری جریان برگشتی نیز توضیح داده می‌شود.

وقتی که حرکت در یک سیال که دارای لزجت بسیار کم است آغاز می‌شود، جریان در لحظه اول اساساً غیر چرخشی خواهد بود. از آنجا که سیال در مجاورت مرزها نسبت به مرزها دارای سرعت صفر است، گرادیان سرعت از مرزها تا جریان سیال زیاد می‌باشد. گرادیان سرعت در یک سیال واقعی در نزدیکی نیروهای برشی مرزی شروع می‌شود و سرعت جریان نسبت به مرز را کاهش می‌دهد. آن لایه از سیال که تحت تأثیر برش مرزی سرعت خود را دارد، لایه مرزی نامیده می‌شود. سرعت در لایه مرزی به طور متقارن به سمت سرعت جریان اصلی میل می‌کند. لایه مرزی در انتهای جریان بالادست خطوط جریان حتی در حالت یکنواخت نیز بسیار نازک است. وقتی که این لایه حرکت کند، عملکرد مداوم تنش برشی تمایل به متوقف کردن ذرات اضافی سیال دارد و در نتیجه با افزایش فاصله نسبت به جریان بالادست، ضخامت اولیه افزایش خواهد یافت. همچنین سیال در لایه مورد نظر تحت گرادیان فشار قرار می‌گیرد که به کمک جریان پتانسیلی محاسبه می‌شود. حاصل عمل در صورتی که فشار در جریان پائین دست زیاد باشد، کاهش مومنتم (گرادیان فشار معکوس) خواهد بود. جریان در خارج از لایه مرزی ممکن است باعث ورود مومنتم به لایه شود. برای مرزهای بالادست سطوح صاف، لایه مرزی به صورت لایه مرزی آرام شروع می‌شود که در آن ذرات سیال در لایه‌های صاف و یکنواخت حرکت می‌کنند. با افزایش ضخامت لایه مرزی آرام، ناپایداری لایه افزایش خواهد یافت و نهایتاً به لایه مرزی متلاطم تبدیل می‌شود که در آن ذرات سیال در مسیرهای تصادفی حرکت می‌کنند، گرچه سرعت آنها به دلیل لزجت در مرز کاهش می‌یابد. وقتی که لایه مرزی متلاطم شد، هنوز لایه بسیار نازکی در مجاورت مرز وجود دارد که دارای حرکت آرام است که آن را زیر لایه آرام می‌نامند.

تعاریف مختلفی برای ضخامت لایه مرزی پیشنهاد شده است. ابتدایی ترین تعریف به جابجایی جریان اصلی به دلیل کنده شدن حرکت ذرات سیال در ناحیه مرزی، برمی‌گردد. این ضخامت،  $\delta$  را ضخامت جابجایی می‌نامند که با رابطه (۷-۲۱):

$$U\delta = \int_0^{\delta} (U-u) dy \quad (۷-۲۱)$$

بیان می‌شود و در آن  $\delta$  مقدار  $y$  در جریان توزیع نشده با  $u = U$  می‌باشد. ضخامت لایه مرزی، فاصله‌ای است که نسبت به نقطه‌ای با  $u/U = 0.99$  تعیین شود.

در ادامه جریان روی یک صفحه موازی با جهت سرعت بالادست به عنوان جریان روی اجسام با لبه نازک (*Streamlines bodies*) و روی یک استوانه به عنوان جسم با لبه پهن (*blunt bodies*) در نظر گرفته می‌شود.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



## جریان روی جسمی با لبه نازک (Streamlined Bbodies)

صفحه‌ای با طول  $\ell$  و موازی با سرعت بالادست را در نظر بگیرید. برای سه حالت  $Re = \frac{\rho U \ell}{\mu}$  برابر با  $10^7$ ،  $10^4$  و  $10^2$  مطابق

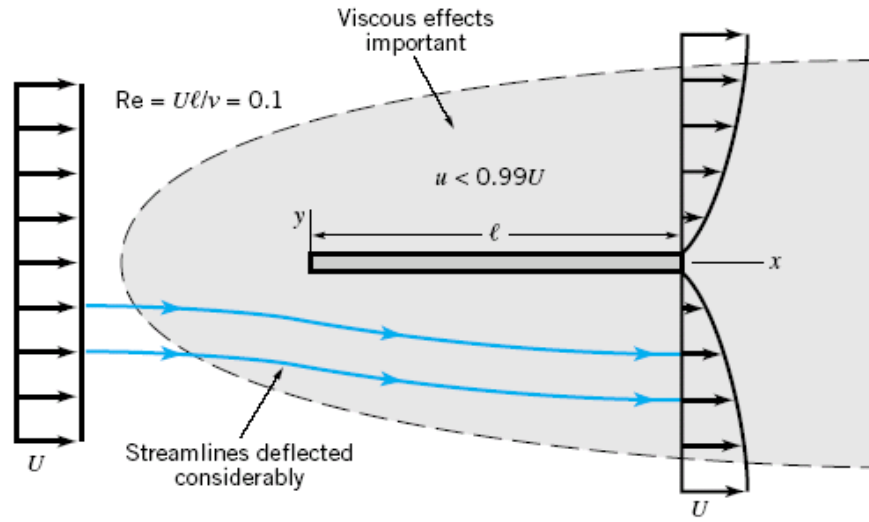
شکل ۷-۲۲ بررسی صورت می‌گیرد. اگر عدد رینولدز، کوچک باشد، اثرات ویسکوزیته نسبتاً قوی است و صفحه روی جریان یکنواخت بالادست در جهت‌های جلو، بالا، پایین و عقب اثر می‌گذارد. آن بخشی از میدان جریان که سرعت کمتر از یک درصد مقدار اصلی آن تغییر می‌کند (یعنی  $U-u < 0.01U$ )، در فواصل نسبتاً دوری از صفحه قرار دارند. در واقع در اعداد رینولدز کوچک، اثرات ویسکوزیته در فواصل دور از جسم در تمام جهات حس می‌شود (شکل ۷-۲۲-الف).

با افزایش عدد رینولدز (برای مثال، افزایش  $U$ )، ناحیه‌ای که در آن اثرات ویسکوزیته اهمیت دارد، در تمام جهات بجزء پایین دست کوچک‌تر می‌شود (شکل ۷-۲۲-ب). در این حالت خطوط جریان از مسیر اصلی خود در شرایط در جریان بالادست منحرف شده اما میزان انحراف مانند قسمت الف زیاد نیست.

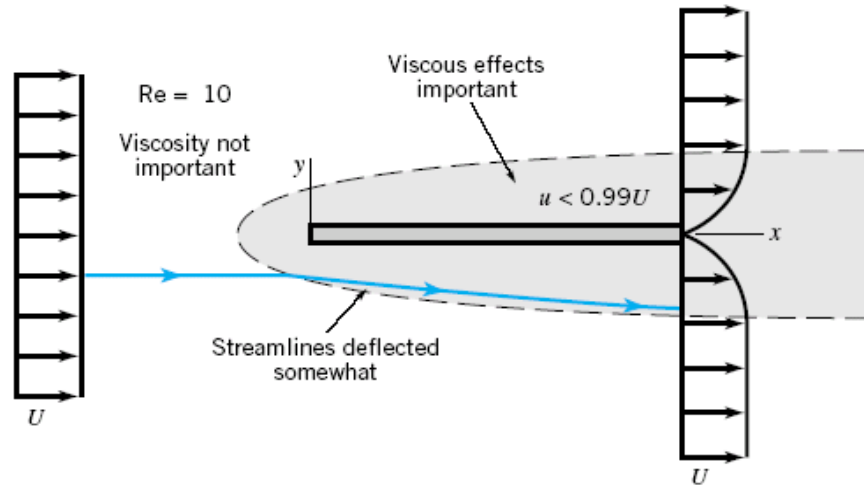
اگر عدد رینولدز بزرگ (نه بی‌نهایت) باشد، اثرات اینرسی غالب است و اثرات ویسکوزیته تنها در ناحیه خیلی نزدیک به سطح اهمیت دارند (شکل ۷-۲۲-ج). از آنجا که ویسکوزیته سیال صفر نیست، سیال طبق شرط بدون لغزش باید به سطح جامد بچسبد. لذا یک ناحیه لایه مرزی نازک به ضخامت  $\delta = \delta(x) \ll \ell$  وجود دارد که ضخامت آن نسبت به طول صفحه خیلی کم است. این لایه در مجاورت صفحه است و سرعت سیال در آن از مقدار بالادست  $u = U$  تا سرعت صفر روی صفحه تغییر می‌کند. در ابتدای صفحه، ضخامت لایه مرزی صفر است و در جهت جریان ضخامت آن افزایش می‌یابد. جریان درون لایه مرزی می‌تواند با توجه به پارامترهای مختلف آرام یا درهم باشد. در عدد رینولدز زیاد، خط جریان خارج از لایه مرزی تقریباً موازی با صفحه است. در واقع حضور صفحه اثر خیلی کمی روی خط جریان خارج از لایه مرزی دارد.



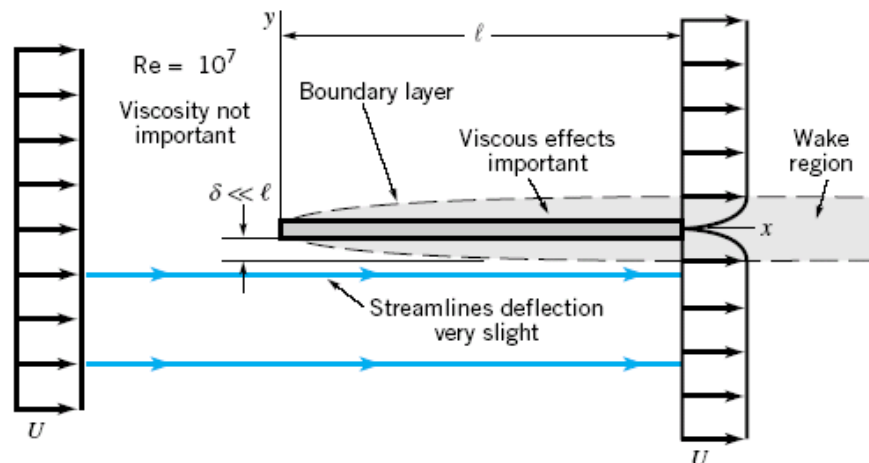
# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



(a)



(b)



(c)



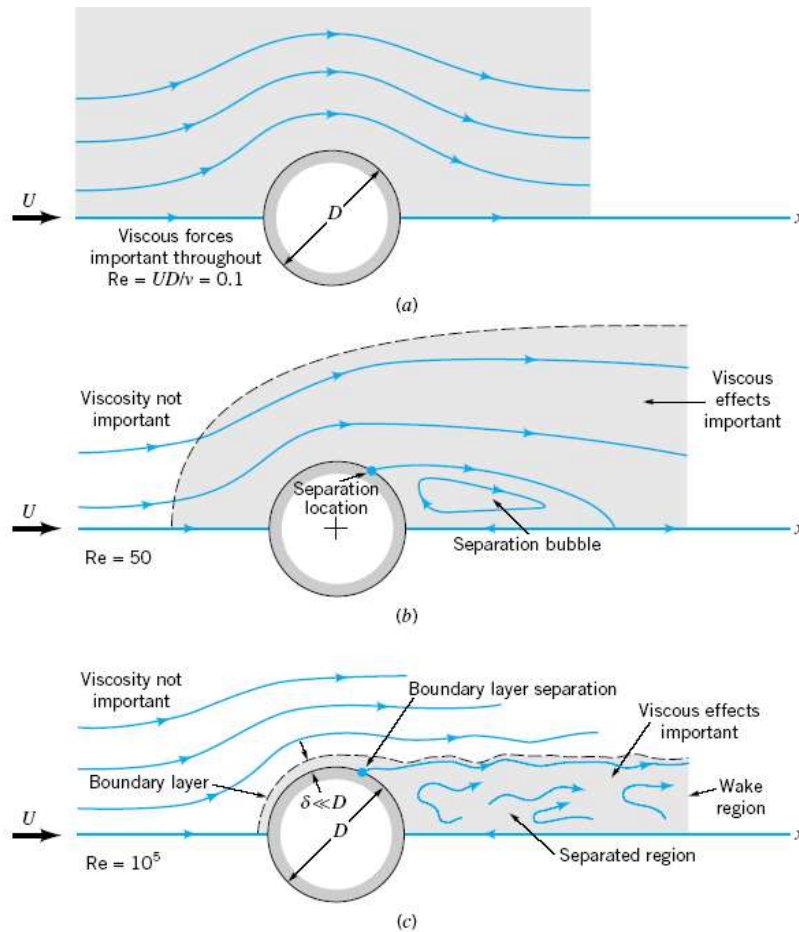
# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



شکل ۷-۲۲- بررسی جریان پایا و ویسکوز روی یک صفحه تخت موازی با جریان در رینولدزهای مختلف [۲]

## جریان روی اجسام با لبه پهن (Blunt Bodies)

هنگامیکه سیال از روی اجسامی با لبه پهن (*blunt*) مانند استوانه عبور می‌کند، می‌تواند دارای اعداد رینولدز متفاوتی باشد. به طور کلی هر چقدر عدد رینولدز بزرگ‌تر باشد، ناحیه‌ای از میدان جریان که در آن اثرات ویسکوزیته مهم هستند، کوچکتر است. برای اجسامی که خیلی دارای لبه نازک نیستند، مشخصه دیگری از جریان نیز مشاهده می‌گردد که جداسازی جریان نام دارد (شکل ۷-۲۳). در این حالت بعد مشخصه در تعریف عدد رینولدز، قطر استوانه ( $D$ ) است.



شکل ۷-۲۳- مشخصات جریان پایا و ویسکوز روی یک استوانه در رینولدزهای مختلف [۲]

جریان با عدد رینولدز کوچک ( $\text{Re} = \frac{UD}{\nu} < 1$ ) از روی استوانه‌ای عبور می‌کند. در این حالت به دلیل حضور استوانه، اثرات

ویسکوزیته در سرتاسر ناحیه نسبتاً بزرگی از میدان جریان حس می‌شود. مطابق شکل ۷-۲۳-الف، برای  $\text{Re} = \frac{UD}{\nu} = 0.1$  اثرات



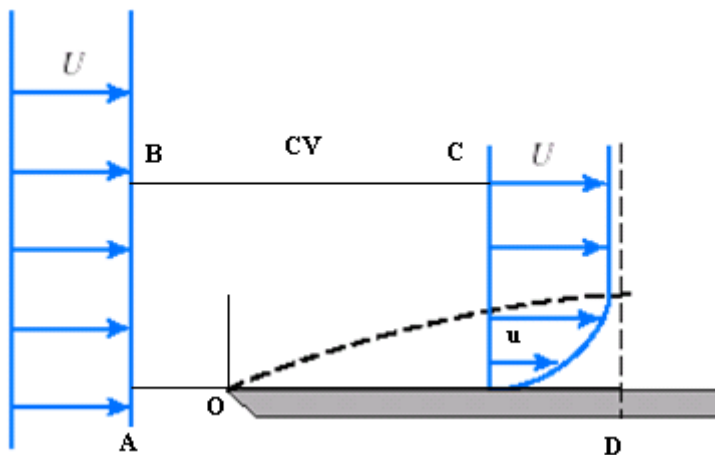
# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



ویسکوزیته تا چندین برابر قطر در تمام جهات اطراف استوانه مهم است. مطابق این شکل، خطوط جریان نسبت به محور استوانه متقارن هستند.

## کاربرد معادلهٔ مومنتم در لایه مرزی

در شکل ۷-۲۴، یک حجم کنترل که سیال بالای صفحه را پوشانده است دیده می‌شود. فرض می‌کنیم سیال به اندازه فاصله  $x$  در طول صفحه گسترش یافته است. در جهت  $y$  نیز به اندازهٔ فاصله  $h$  گسترش یافته است که با این فاصله سرعت در جهت  $x$  توزیع نشده باقی می‌ماند (گرچه قسمتی از جریان در صفحه بالایی وجود دارد که از حجم کنترل خارج می‌شود).



شکل ۷-۲۴ - حجم کنترل در جریان بر روی یک صفحهٔ مسطح [۳]

معادله مومنتم حرکت برای جهت  $x$  عبارت است از (رابطه ۷-۲۲):

$$\sum F_x = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u \, dv + \int_{CS} \rho u \, dA \quad (۷-۲۲)$$

این معادله در حالی که کار برده می‌شود که جریان تراکم‌ناپذیر و پایدار باشد. تنها نیروی مؤثر بر صفحه درگ یا تنش برش است، زیرا فشار در اطراف محیط حجم کنترل ثابت می‌باشد. برای واحد عرض بر روی صفحه عمود بر کاغذ داریم (رابطه ۷-۲۳):

$$\text{نیروی درگ} = \rho \int_0^h u^2 \, dy - \rho^2 h + \rho \int_0^h (Uu) \, dy \quad (۷-۲۳)$$

عبارت اول در سمت راست معادله، خروج مومنتم  $x$  از  $CD$  و عبارت دوم ورود مومنتم  $x$  از  $AB$  می‌باشد. انتگرال عبارت سوم حجم خالص ورودی سیال از طریق  $AB$  و  $CD$  می‌باشد که با توجه به معادلهٔ پیوستگی باید مساوی حجم خروجی سیال از  $BC$  باشد. این مقدار در  $\rho U$  ضرب می‌شود تا مومنتم خروجی از  $x$  در جهت  $BC$  به دست آید. از ترکیب انتگرال‌ها خواهیم داشت (رابطه ۷-۲۴):

$$\text{نیروی درگ} = \rho \int_0^h u(U-u) \, dy \quad (۷-۲۴)$$

درگ اعمال شده بر صفحه را می‌توان به صورت انتگرال تنش برشی روی صفحه بیان کرد (رابطه ۷-۲۵):



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



$$\mathcal{D}(x) = \int_0^x \tau_w dx \quad (25-7)$$

از مساوی قرار دادن عبارات (24-7) و (25-7) و مشتق گیری نسبت به  $x$  رابطه 26-7:

$$\tau_w = \rho \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u(U-u) dy \quad (26-7)$$

به دست می آید که معادله مومنتم برای جریان دو بعدی در طول صفحه مسطح است.

محاسبات میزان رشد لایه مرزی در حالت کلی، پیچیده است. حالات جریان موازی، آرام یا درهم، بر روی یک صفحه مسطح را می توان به طور تقریبی با استفاده از روش های مربوط به مومنتم به دست آورد که با جزئیات توزیع سرعت همراه نیست و در حقیقت توزیع سرعت را باید فرض کرد.

برای یک توزیع سرعت فرضی که شرایط مرزی  $u=U, y=\delta, u=0, y=0$  را ارضاء کند، ضخامت اولیه لایه مرزی را همانند تنش برشی در مرزها می توان محاسبه کرد. فرض می شود که توزیع سرعت در هر مقداری از  $x$  وقتی که  $\delta$  معلوم نیست، یکسان باشد (رابطه 27-7):

$$\frac{u}{U} = F\left(\frac{y}{\delta}\right) = F(\eta) \quad \eta = \frac{y}{\delta} \quad (27-7)$$

برای لایه مرزی در جریان آرام، پیرانت فرض کرد (رابطه 28-7):

$$\frac{u}{U} = F = \frac{3}{2}\eta - \frac{\eta^3}{2} \quad 0 \leq y \leq \delta$$

$$F=1 \quad \delta \leq y \quad (28-7)$$

که شرایط مرزی را ارضاء می کند. معادله (26-7) را می توان به صورت زیر (رابطه 29-7) مرتب کرد:

$$\tau_w = \rho U^2 \frac{\partial \delta}{\partial x} \int_0^1 \left(1 - \frac{u}{U}\right) \frac{u}{U} d\eta \quad (29-7)$$

و (رابطه 30-7):

$$\tau_w = \rho U^2 \frac{\partial \delta}{\partial x} \int_0^1 \left(1 - \frac{3}{2}\eta + \frac{\eta^3}{2}\right) \left(\frac{3}{2}\eta - \frac{\eta^3}{2}\right) d\eta = 0.139 \rho U^2 \frac{\partial \delta}{\partial x} \quad (30-7)$$

در مرز داریم (رابطه 31-7):

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = \mu \frac{U}{\delta} \frac{\partial F}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = \mu \frac{U}{\delta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{3}{2}\eta - \frac{\eta^3}{2}\right) \Big|_{\eta=0} = \frac{3\mu U}{2\delta} \quad (31-7)$$

از تساوی دو عبارت (30-7) و (31-7) برای  $\tau_w$  داریم (رابطه 32-7):

$$\frac{3\mu U}{2\delta} = 0.139 \rho U^2 \frac{\partial \delta}{\partial x} \quad (32-7)$$



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

و پس از مرتب کردن رابطه (۳۳-۷) بدست می آید:

$$\delta d\delta = 10.78 \frac{\mu dx}{\rho U} \quad (33-7)$$

چون  $\delta$  در این معادله فقط تابعی از  $x$  است، با انتگرال گیری از رابطه (۳۳-۷) رابطه (۳۴-۷) بدست می آید:

$$\frac{\delta^2}{2} = 10.78 \frac{\nu}{U} x + C_1 \quad (34-7)$$

اگر برای  $x=0$  و  $\delta=0$  باشد، ثابت انتگرال گیری صفر است. از حل رابطه برای  $\delta/x$  خواهیم داشت (رابطه ۳۵-۷):

$$\frac{\delta}{x} = 4.65 \sqrt{\frac{\nu}{Ux}} = \frac{4.65}{\sqrt{Re_x}} \quad (35-7)$$

که در آن  $Re_x = Ux/\nu$  عدد رینولدز بر مبنای فاصله  $x$  از ابتدای صفحه است. این معادله برای ضخامت لایه مرزی در جریان آرام نشان می دهد که  $\delta$  به صورت ریشه دوم فاصله از لبه صفحه افزایش می یابد.

با جایگزینی مقدار  $\delta$  در معادله ۳۱-۷ داریم:

$$\tau_w = 0.322 \sqrt{\mu \rho U^3} \quad (36-7)$$

تنش برشی با نسبت عکس ریشه دوم  $x$  و نسبت مستقیم سه دوم سرعت تغییر می کند. درگ بر روی یک وجه از صفحه با عرض واحد برابر است با (رابطه ۳۷-۷):

$$\int_0^l \tau_w dx = 0.644 \sqrt{\mu \rho U^3} l \quad (37-7)$$

انتخاب توزیع سرعتی متفاوت با حالت فوق چندان تغییری در نتایج ایجاد نمی کند. از حل دقیق معادلات عمومی حرکت سیال لزج به وسیله بلازیوس ضرایب  $0.322$  و  $0.664$  برای معادلات فوق بدست آمده است. نیروی درگ را می توان برحسب ضریب درگ  $C_D$  ضرب در فشار سکون  $\rho U^2/2$  و مساحت صفحه  $l$  (در واحد پهنا) بیان کرد (رابطه ۳۸-۷):

$$C_D \frac{\rho U^2}{2} l = \text{نیروی درگ} \quad (38-7)$$

که در آن برای لایه مرزی (رابطه ۳۹-۷):

$$C_D = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}} \quad (39-7)$$

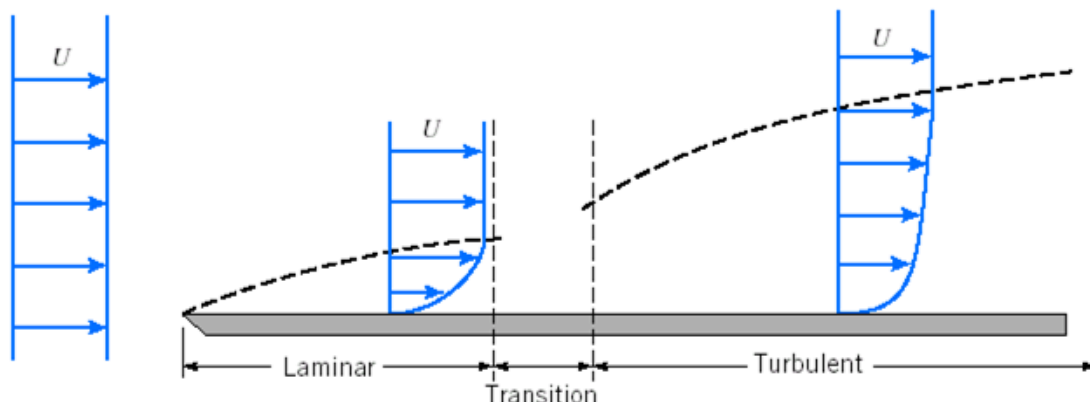
$Re_L = U\rho/\nu$  می باشد.

وقتی که عدد رینولدز برای صفحه به مقداری بین  $5 \times 10^5$  و  $10^6$  می رسد، لایه مرزی متلاطم خواهد شد. شکل ۲۵-۷ رشد لایه و گذر از لایه مرزی آرام به متلاطم را نشان می دهد. عدد رینولدز به تلاطم اولیه در جریان سیال، لبه ابتدای صفحه و زبری صفحه بستگی دارد.





# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



شکل ۷-۲۵- رشد لایه مرزی (محور عمودی بزرگ شده است) [۳]

## بررسی نیروهای وارد بر جسم از طرف جریان

### سیال اطراف آن جسم

#### اثرات جریان سیال بر روی اجسام (نیروی لیفت و درگ)

منظور از "جریان خارجی" جریان سیال در اطراف اجسامی همچون هواپیما، زیر دریایی، موشک و امثال آنها می باشد. ویژگی بارز این جریان در این است که حجم وسیعی از سیال دور تا دور جسم را فرا گرفته است بطوریکه جریان مذکور در حین عبور از اطراف جسم مورد نظر به آن نیرو (نیروی لیفت و درگ) وارد می کند و ما می خواهیم بعضی روابطی که بین این نیروها و خواص سیال، خواص هندسی جسم و پارامترهای سینماتیک جریان (سرعت، سیرکولاسیون و...) وجود دارد را بررسی کنیم. [2]

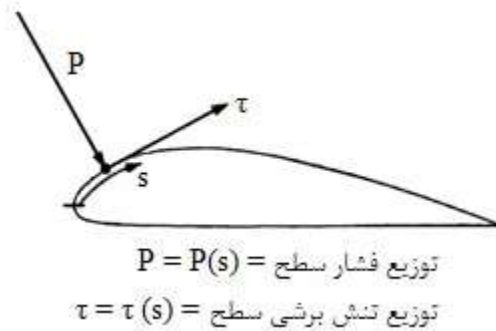
در جریان های داخلی (که منظور از آنها جریانی است که در آن سیال از هر طرف با یک دیوار احاطه شده باشد مانند جریان آب در یک لوله پر از آب یا جریان هوا در کانال کولر)، در تمام میدان جریان اثرات ویسکوزیته وجود دارند در حالیکه در جریان خارجی، اثرات ویسکوزیته به بخشی از میدان جریان از قبیل لایه مرزی و دنباله ها (wakes) محدود می شود. [12]

در جریان خارجی، صرف نظر از پیچیدگی شکل جسم، نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی (یا هیدرودینامیکی) وارد بر جسم به طور کلی از دو منبع: 1. توزیع فشار بر روی سطح جسم 2. توزیع تنش برشی بر روی سطح جسم) ریشه می گیرند. تنها مکانیسم طبیعت برای وارد کردن نیرو بر روی جسمی که از میان سیالی می گذرد، توزیع های فشار و تنش برشی بر روی سطح آن جسم هستند. ب[عد فشار  $P$  و تنش برشی  $\tau$ ، هر دو، نیرو بر واحد سطح (پوند بر فوت مربع یا نیوتن بر متر مربع) است و مانند شکل 2-1 فشار  $P$  عمود بر سطح و تنش برشی  $\tau$  مماس بر سطح وارد می شود. منشأ تنش برشی «کشش بین مولکولی» بر روی سطح است که از اصطکاک بین جسم و سیال بوجود می آید. اثر خالص انتگرال تابع های تعمیم یافته  $P$  و  $\tau$  بر روی کل سطح جسم، همچون

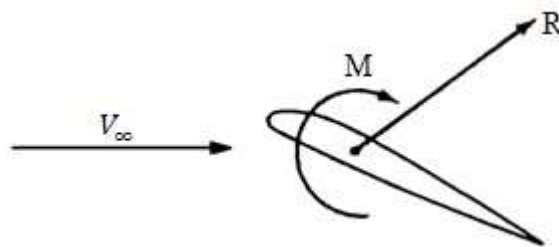


# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

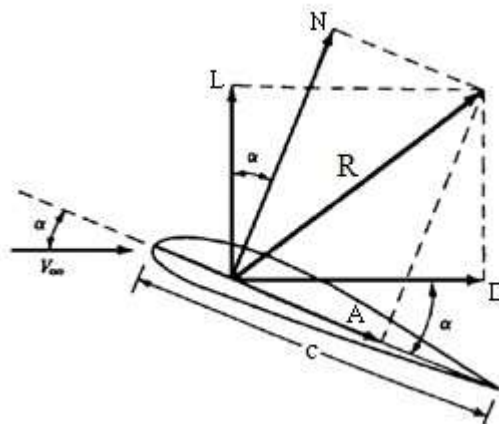
در شکل 2-2 ، نیروی برآیند آئرو دینامیکی ( یا هیدرو دینامیکی )  $R$  و گشتاور آئرو دینامیکی  $M$  بر روی جسم است . برآیند  $R$  نیز می تواند به مؤلفه هایی تقسیم شود ، که دو مجموعه مؤلفه در شکل 2-3 دیده می شوند . در شکل مذکور نیروی نسبی است که به صورت سرعت جریان در نقطه ای دورتر از خود جسم تعریف می شود . جریان دور از جسم را جریان آزاد نامیده می شود.



شکل 2-1: نمایش فشار و تنش برشی بر روی سطح آئرو دینامیکی ( یا هیدرو دینامیکی ) . [13]



شکل 2-2: برآیند نیرو و گشتاور آئرو دینامیکی ( یا هیدرو دینامیکی ) وارد بر جسم . [13]



شکل 2-3: برآیند نیروی آئرو دینامیکی ( یا هیدرو دینامیکی ) و دو مجموعه از مؤلفه ها ، که می توان برآیند را به آنها تجزیه کرد.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



در شکل 2-3 بنا بر تعریف : [کتاب اندرسون]

مؤلفه R موازی با  $D \equiv$  پسا  $L \equiv$  مؤلفه R عمود بر  $L \equiv$  برآ

هنگامیکه سیال بر روی یک جسم صلب حرکت می کند ، نیروهای فشاری عمود بر سطح و نیروهای برشی به موازات سطح در طول سطح خارجی جسم به آن جسم وارد می کند . ما معمولاً ترجیح می دهیم که برآیند نیروهای فشاری و برشی را که بر روی جسم اعمال می شود را بررسی کنیم نسبت به این که بخواهیم جزئیات توزیع های این نیروها را در تمام طول سطح جسم بررسی کنیم . مؤلفه برآیند نیروهای فشاری و برشی که در امتداد جریان عمل می کند را نیروی درگ ( Drag Force ) و مؤلفه ای که به صورت عمود بر امتداد جریان عمل می نماید نیروی لیفت ( Lift Force ) می نامند . [12]

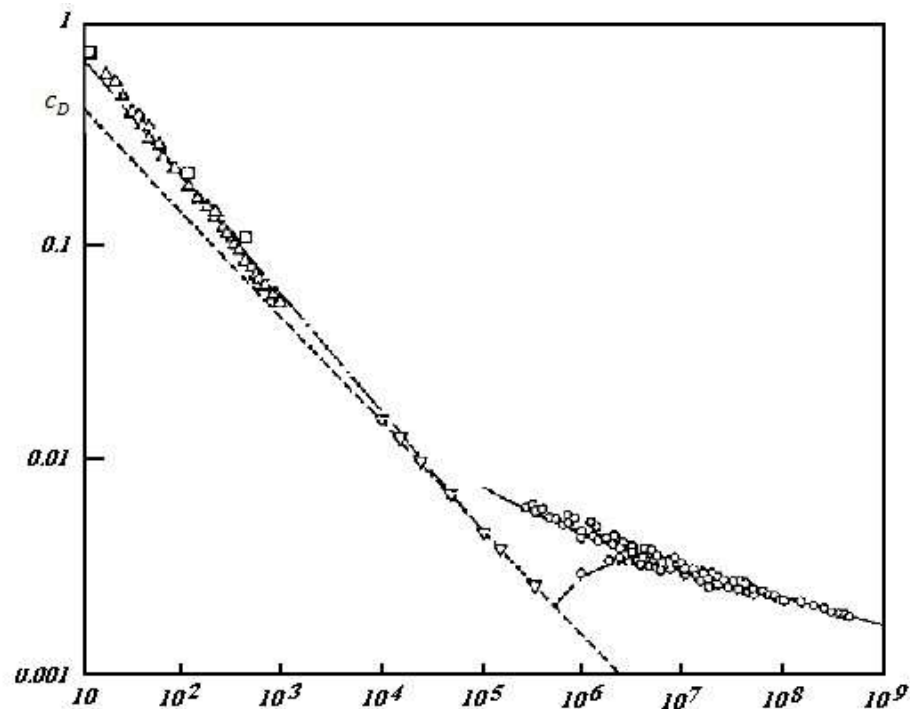
چند مطلب بسیار مهم در تمامی شاخه های تئوری و آزمایشگاهی مکانیک سیالات که از قانون تشابه حاصل از معادله 1-6 ( استفاده می کنند قابل تامل است . اول آنکه ضرایب بدون بعد ، و  $Re$  مستقل از سیستم واحدهای به کار گرفته شده هستند . تعیین توابع  $(Re)$  و  $(Re)$  ، معمولاً به صورت تئوری امکان پذیر نیست و برای بدست آوردن آنها ، مجبور به انجام آزمایش می باشیم . اگر بخواهیم به عنوان مثال ضریب پسای یک کره را از طریق آزمایش بدون استفاده از اصل تشابه بر اساس عدد رینولدز بدست آوریم ، می بایست اثر چهار متغیر مستقل  $V, d, \rho, \mu$  را بررسی کنیم که در این صورت لازم است که تعداد فوق العاده زیادی آزمایش انجام دهیم . اما با استفاده از اصل تشابه بر اساس عدد رینولدز  $Re$  ، می دانیم که ضرایب بدون بعد برای کره هایی با قطرهای مختلف  $d$  ، در سیالاتی با سرعت های مختلف  $V$  ، و سیالات مختلف با  $\rho$  و  $\mu$  متفاوت ، تنها به عدد بدون بعد رینولدز  $Re$  وابسته می باشند .

تایید اصل تشابه بر اساس آزمایشات در شکل 2-7 نشان داده شده است ، در این شکل وابستگی ضریب پسای یک صفحه مسطح با زاویه حمله صفر به عدد رینولدز نشان داده شده است . ضرایب پسایی که از صفحاتی با طول های کاملاً متفاوت بدست آمده اند همگی بر روی یک منحنی قرار گرفته اند .

[10]



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



$$Re = \frac{U_{\infty} l}{\nu}$$

- اندازه گیری ها : ○  
 △  
 ▽  
 تئوری : -----  
 —————  
 .....  
 عددی : □
- محققین مختلف ، صفحه 653 از نسخه قبلی کتاب ( H. Schlichting 1982 )  
 جانر ( Z. Janour 1951 )  
 اشکونهر ( K.E. Schoenherr 1932 )  
 حالت لایه ای ، از رابطه بلازیوس ( 10-2 ) کتاب شلیختینگ  
 حالت مغشوش ، از رابطه ( 14-2 ) کتاب شلیختینگ  
 بسط حالت جریان لایه ای ، از رابطه ( 62-14 ) کتاب شلیختینگ  
 پاسخ معادلات نویر-استوکس توسط دنیس ، به ولدمن ( A.E.P Veldman 1976 ) رجوع کنید.

شکل 2-7 : وابستگی ضرایب یک صفحه مسطح با زاویه حمله صفر به عدد رینولدز در رابطه ( 2-5 ) داده شده است .  $S = l \cdot b$

فرض شده است که  $l$  طول صفحه و  $b$  عرض صفحه می باشد . [10]

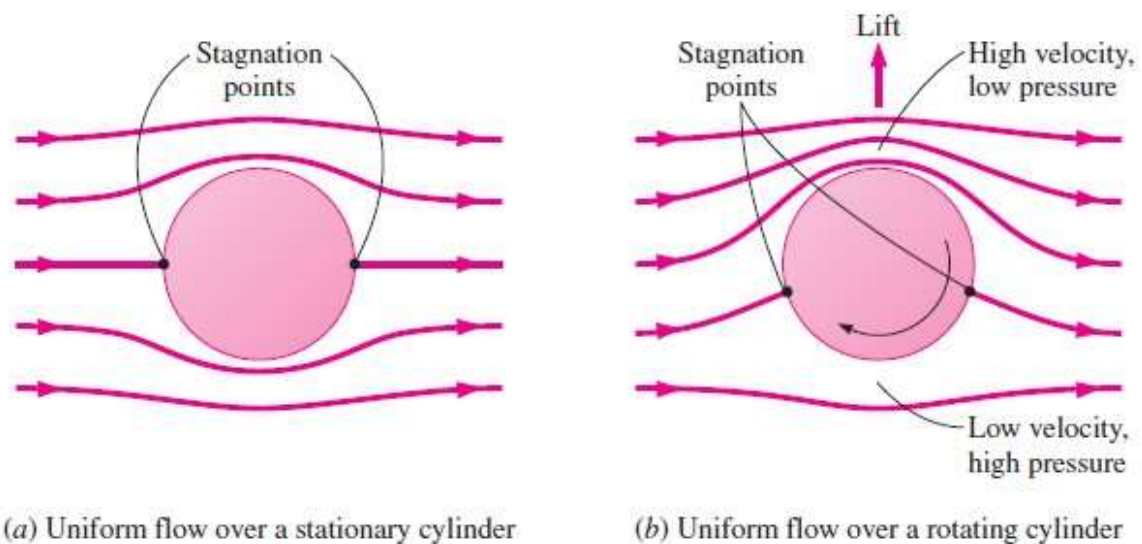


# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



## 2-4 نیروی لیفت تولید شده توسط دوران جسم ( لیفت به واسطه سیرکولاسیون )

تا به حال مشاهده کرده ایم که با دادن یک چرخش به توپ تنیس و یا با زدن ضربه رو به پایین به قسمت جلوی توپ تنیس یا پینگ پونگ می توان مشخصه های بالارفتن و خیز آنها را تغییر داد و سبب شد که توپ خط سیر و جستن مطلوب تری داشته باشد . بازیکنان گلف ، فوتبال ، بیس بال نیز چرخش توپ را در بازی هایشان به کار می برند .



شکل 2-8 تولید نیروی لیفت در جریان یکنواخت هنگامیکه جریان پتانسیل (ایده آل) داریم. (جریان حقیقی شامل جدایش جریان در بعد از استوانه می شود) [12]

پدیده تولید نیروی لیفت توسط دوران جسم صلب ، بعد از دانشمند آلمانی هینریش ماگنوس

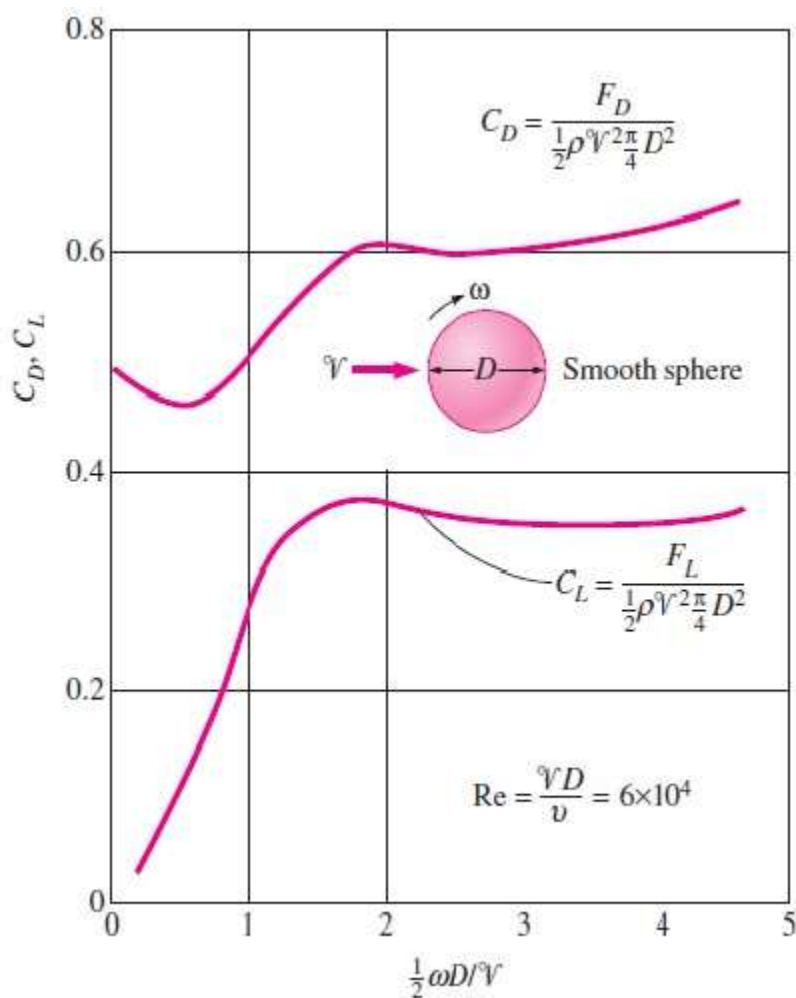
( Heinrich Magnus 1802-1870 ) که اولین کسی بود که بر روی نیروی لیفت جسم های دوار مطالعه کرد ، اثر ماگنوس ( Magnus effect ) نامیده شده است و این مطلب در شکل 2-8 به تصویر کشیده شده است . هنگامی که توپ نمی چرخد ، نیروی لیفت صفر است و علت این است که جریان در بالا و پایین استوانه تقارن دارد . اما زمانی که استوانه حول محورش دوران داده می شود ، استوانه مقداری از سیال اطرافش را با خود می کشد و به حرکت در می آورد که این عمل به علت شرط عدم لغزش است و میدان جریان برهمنهی جریان دوار و غیر دوار را بازتاب می دهد . نقاط سکون به پایین تغییر مکان می دهند و جریان نسبت به صفحه افقی که از مرکز استوانه می گذرد متقارن باقی نمی ماند . میانگین فشار در نیمه بالایی کمتر از میانگین فشار در نیمه پایینی است و این به علت اثر برنولی است و در نتیجه یک نیروی خالص به سمت بالا ( نیروی لیفت ) بر استوانه اعمال می شود . بحث مشابهی برای نیروی لیفت تولید شده توسط توپی که می چرخد می توان ارائه کرد .



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



اثر نرخ (شدت تغییرات) دوران بر ضریب لیفت و درگ یک کره با سطحی صاف در شکل 2-9 نشان داده شده است. باید توجه کرد که ضریب لیفت به شدت به نرخ دوران به خصوص در سرعت های زاویه ای پایین وابستگی دارد. اثر نرخ دوران بر ضریب درگ کم است. زبری نیز بر ضریب لیفت و درگ اثر می گذارد. در محدوده خاصی از عدد رینولدز، زبری اثر مطلوبی برای افزایش ضریب لیفت و کاهش ضریب درگ ایجاد می کند. بنابراین در اثر ضربه یکسان، توپ های گلف با مقدار اصلاح شده ای از زبری نسبت به توپ های صاف بالاتر و دور تر طی مسیر می کنند.



شکل 2-9 تغییرات ضریب های لیفت و درگ با نرخ دوران برای  $Re = 6 \times 10^4$



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



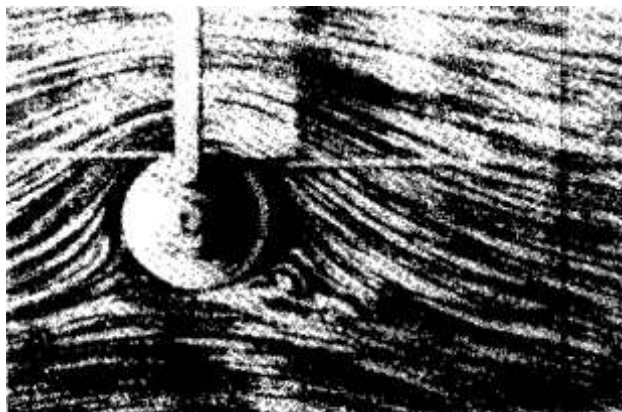
روش های کاهش درگ اصطکاکی و فشاری

## 1-2-3 کنترل لایه مرزی

برای کنترل لایه مرزی ، با استفاده از شرایط مصنوعی ، رفتارهای خاصی را در لایه مرزی ایجاد می کنند. که برای این کار از روش های مختلفی استفاده می کنند و ما در اینجا به طور کلی به آنها اشاره می کنیم : [10]

### 1) حرکت دیوار جامد :

یک روش بهینه برای جلوگیری از جدایش آن است که به طور کلی از ایجاد لایه مرزی جلوگیری کنیم . از آنجا که لایه مرزی از اختلاف سرعت بین دیوار و جریان خارجی (شرط عدم لغزش) بوجود می آید ، با حذف این اختلاف سرعت می توان از پیدایش آن جلوگیری کرد . این کار را می توان با حرکت دادن دیوار در جهت جریان انجام داد . دیوار متحرک را می توان به سادگی با یک استوانه در حال چرخش در درون جریان ، عملی کرد . شکل ۳-۲ تصویر جریان روی استوانه چرخان را در حالتی که جریان عمود بر محور استوانه است نشان می دهد . در بالای استوانه که جهت جریان و جهت چرخش یکسان می باشند ، جدایی لایه مرزی بطور کامل از بین رفته است . میدان جریان نامتقارن است . جریان خارجی غیر لزج ، متناظر با جریان روی یک استوانه با وجود چرخش است . که در نهایت همانطور که در فصل قبل گفتیم، این جریان یک نیروی عمودی ایجاد می کند که اثر ماگنوس نام دارد .



شکل 2-3 : جریان روی یک استوانه در حال چرخش . [10]

در عمل، تلاشهای خاصی نیز صورت گرفته است تا از نیروی عمودی استوانه های در حال چرخش برای به حرکت درآوردن کشتیها استفاده شود، به توضیحات آکرت (Ackeret 1925) در مورد " روتور فلتنر " مراجعه کنید.



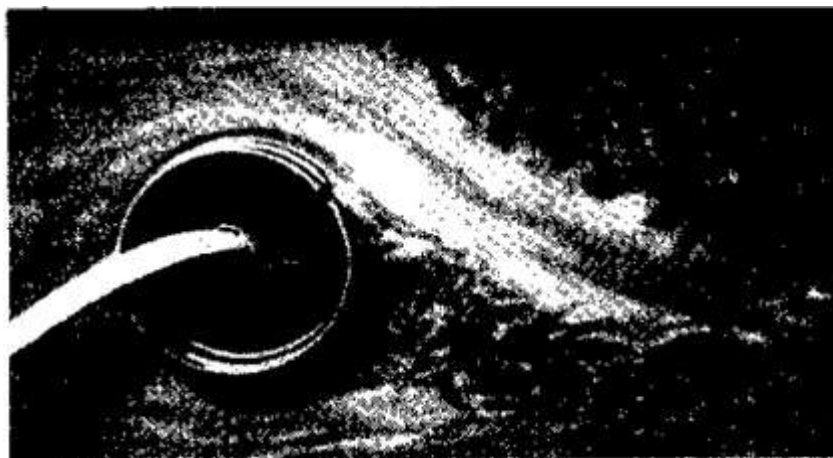


# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

واقعیت بخشیدن به این اصل برای اجسامی با اشکال دیگر مشکل است، به این دلیل، این روش کاربردهای عملی کمی دارد. اما اثر دیواره متحرک در آیروفویل بطور آزمایشگاهی توسط فاوره (A. *favre 1938*) با جزئیات فراوان بررسی شده است. در این مورد یک تسمه بر روی سطح بالایی یک آیروفویل روی دو غلتک به حرکت درآورده شد، که حرکت برگشتی این تسمه در درون آیروفویل صورت می گرفت. این ترکیب بسیار کارآمد بود و برای زاویه های حمله بزرگ (حدوداً  $55^\circ =$ ) ضریب برآی ماکزیمم  $3.5 =$  بدست آمد.

۲) مکش از یک شکاف :

پراندل (L. Prandtl 1904) در قسمت اول تحقیقات خود بر روی لایه های مرزی، لایه مرزی را بطور مصنوعی تغییر داده بود تا بتواند ایده های اصلی خود را ثابت کند. در این مسیر او با نتایج جالب توجهی روبرو شد. شکل 3-3 جریان روی استوانه ای را نشان می دهد که در یک طرف آن جریان از طریق شکاف، به درون مکیده شده است. در طرفی از استوانه که مکش صورت گرفته است، جریان به مقدار زیادی سطح را دنبال می کند و در نتیجه از جدایی جریان جلوگیری می شود. نتیجه این عمل آن است که پسا به مقدار زیادی کاهش می یابد. بطور مشابه به علت آنکه جریان متقارن نیست، یک نیروی عمودی تولید می شود. مکش از طریق شکاف برای دیفیوزرها نیز به کار می رود. [10]



شکل 3-3: جریان روی یک استوانه که لایه مرزی در یک طرف آن مکیده می شود. (L. Prandtl 1904)

[10]. Prandtl 1904)

اثر مکش از یک شکاف اساساً تغییر توزیع سرعت  $U(x)$  جریان خارجی است. توزیع معمول جریان غیرلزج با توزیع سرعت جریان چاه که از شکاف مکش شروع می شود جمع می شود. این عمل سبب می شود جریان در جلوی شکاف شتاب گیرد و از جدایی جلوگیری شود. در پشت شکاف، چاه باعث گند شدن جریان خارجی می شود، اما در اینجا لایه مرزی می بایست دوباره از ضخامت



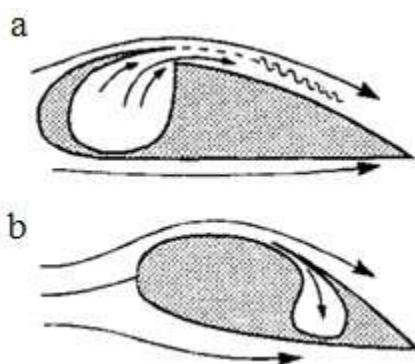


## ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

صفر شروع به بزرگ شدن کند و در نتیجه می تواند در مقابل گرادیانهای فشار بزرگتری بدون ایجاد جدایش ، مقاومت کند . از مکش در یک شکاف در آیروفویلها برای کاهش پسا (S. Goldstein 1948) و همینطور افزایش نیروی برآ (O. Schrenk 1935) ، پاپلتون (E.D. Poppleton 1955) استفاده زیادی شده است . اما لازم به ذکر است که برای کاهش نیروی پسا توسط مکش، می بایست انرژی لازم برای مکش جریان را نیز به حساب آوریم .

### ۳) دمش و مکش مماسی :

راه دیگر برای جلوگیری از جدایش جریان ، آن است که به ذرات سیال موجود در لایه مرزی که دارای انرژی کمی هستند، انرژی اضافی داده شود . این کار را می توان با دمش مماسی سیال با سرعت بالا از داخل جسم انجام داد که در شکل (3-4) نشان داده شده است . با تأمین انرژی جنبشی برای لایه مرزی، مشکل جدایی جریان بطور کلی از بین می رود . اگر سیال بطور مماسی در جلوی فلاپ بال ها دمیده شود، اثر گذاری فلاپ ها به مقدار زیادی افزایش می یابد، به توماس (F. Thomas 1962,1963) و (H. Schlichting 1965b) مراجعه کنید. اگر شدت جریان دمیده به مقدار کافی قوی باشد، حتی می توان از مقدار نیروی برآی پیش بینی شده توسط تئوری پتانسیل نیز فراتر رفت . [10]

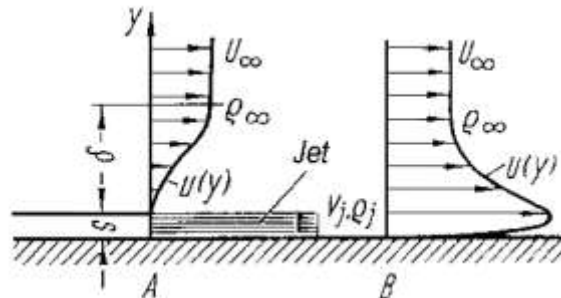


شکل ۳-۴: روش های مختلف اثر گذاری بر روی لایه مرزی . (a) دمش (b) مکش . [10]

درست بعد از محل دمش مماسی، یک پروفیل جت نزدیک دیوار در لایه مرزی ایجاد می شود، شکل 3-5 را ببینید . این پروفیل به سرعت  $U(x)$  در لبه خارجی لایه مرزی منتقل می شود .



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



شکل 3-5: توزیع سرعت در لایه مرزی درست در پشت شکاف به کار گرفته شده برای دمش مماسی.

[10]

جدایی لایه مرزی را می توان توسط "مکش مماسی" نیز از بین برد ، به شکل (3-4) b مراجعه کنید. سیال کم انرژی در لایه مرزی ، قبل از رویداد جدایی توسط مکش حذف می شود . در پشت شکاف مکش ، یک لایه مرزی جدید تشکیل می شود که به مقدار معینی از افزایش فشار غلبه می کند . اگر شکاف در مکان مناسبی قرار گیرد، در شرایط خاصی جدایی جریان هیچگاه بوجود نخواهد آمد . "منحرف کننده لایه مرزی" نیز بر اساس همین اصل عمل می کند . این وسیله در ورودی موتور روی بدنه هواپیما بکار برده می شود . این کار سبب می شود که مطمئن شویم سیال موجود در لایه مرزی که انرژی پایینی دارد ، موفق به ورود نمی شود . [10]

## نتیجه گیری و پیشنهادات

### نتیجه گیری

در فصل اول، ابتدا تاریخچه ای از تلاش های صورت گرفته در زمینه سیالات و لایه مرزی ارائه شد و پس از آن به بررسی مفهوم لایه مرزی و برخی پارامترها و مفاهیم مهم و تأثیر گذار در رفتار لایه مرزی از جمله عدد رینولتز، جریان آرام و درهم، انتقال



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

جریان از آرام به درهم، جدایش جریان و ... پرداختیم. که در این میان، حل معادلات لایه مرزی برای یک حالت ساده یعنی صفحه تخت را نیز بررسی کردیم.

در فصل دوم، نیروهای وارد بر اجسام (نیروهای پسا و برآ) در اثر حرکت سیال اطراف آنها را بررسی کردیم و ضرایب بدون بعدی که برای محاسبه این نیروها به کار می روند را ارائه نمودیم و بعد از آن، چگونگی تولید نیروی برآ و اجسامی که برای تولید نیروی برآ مناسب هستند یعنی آیروفویل ها و هیدروفویل ها و برخی مفاهیم مربوط به آیروفویل ها، به عنوان مثال پدیده استال یا واماندگی، اثرات دهانه بال و ... را تشریح کردیم. پس از پایان مطالب مربوط به برآ به بیان انواع پسا یعنی پسای اصطکاکی، پسای فشاری، پسای القایی، پسای تداخلی، پسای شکلی، پسای موج، پسای اسپری، پسای موج سازی و مکانیزم های ایجاد آنها و برخی عوامل مؤثر در افزایش یا کاهش آنها از جمله محل رخ دادن جدایش و ... پرداختیم.

در فصل سوم هم سعی شد که به طور کلی، شناخته شده ترین روش های کاهش انواع پسا و ساز و کار این روش ها مانند کنترل لایه مرزی، خط جریانی کردن، استفاده از پوشش های سطح، تزریق میکرو حبابها، استفاده از ریبلت ها و ... بیان شوند.

در آخر باید بیان کنیم که با توجه به اهمیت بسیار زیاد کاهش پسا و تاثیر آن بر بسیاری از جنبه های زندگی امروز بشر از نظر اقتصادی، زیست محیطی و ...، در تمام دنیا همچنان تلاش های فراوانی برای کشف روش های جدید کاهش پسا و کارآمد تر کردن روش های موجود در حال انجام می باشد و زمینه های زیادی برای انجام تحقیقات راجع به این موضوع وجود دارد.

## پیشنهادات

پایه های تمدن امروزی، تکنولوژی و پیشرفت کشورها بر مبنای مصرف انرژی می باشد. مصرف انرژی از یک سو ابزاری اساسی برای توسعه و از سوی دیگر، عامل اصلی آلودگی های زیست محیطی است. استفاده بهینه در مصرف انرژی از زمان های بسیار دور یکی از بزرگترین اهداف بشر بوده، که حتی بدون آن که خود متوجه باشد در پی به کار گیری بهترین روش های ممکن بوده است.

وسائل متنوعی ساخته شده اند که تا حد امکان یا از انرژی کمی استفاده می کنند و یا راندمان بالایی دارند، در این میان با گذشت زمان سعی شده تا از انرژی های غیر فسیلی نیز استفاده شود.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



با استفاده علمی و درست از نیروهای وارد بر اجسام در اثر حرکت سیالات (نیروهای برآ و پسا) در اطراف آنها هم می توان روش هایی برای تولید انرژی های پاک ارائه داد که به عنوان مثال تولید برق توسط توربین های آبی ، توربین های بادی و . . . می باشند و هم می توان با اصلاح طراحی ظاهری وسائل و خصوصیات اجزای سازنده آنها مثلاً اصلاح آنها مطابق با استفاده از روش های کاهش پسا ، در مصرف انرژی توسط آنها صرفه جویی کرد به عنوان مثالی برای این مورد می توان به اهمیت نیروهای برآ و پسا در صنعت حمل و نقل (هوایی، آبی، خاکی) اشاره کرد. که تمام موارد گفته شده در علم آیرودینامیک و علم هیدرو دینامیک هیدرودینامیک مورد بحث قرار می گیرند .

از بحث بالا به اهمیت علوم آیرودینامیک و هیدرودینامیک پی می بریم ، پس باید در کشورمان برنامه ریزی درستی برای توسعه این علوم داشته باشیم و همواره باید پیشرفت های این شاخه از دانش و فناوری را در دنیا زیر نظر داشته ، از پیشرفت در زمینه این علوم ، حمایت های مادی و معنوی لازم را به عمل آورده شود. از طرف دیگر، نهادهای مرتبط باید پیشرفت های روز دنیا در زمینه آیرودینامیک و هیدرودینامیک و کاربرد آنها را به صنایع مربوطه معرفی کنند که این امر مستلزم شناخت درستی از نیازهای هر بخش از صنعت می باشد.

همچنین باید از پروژه های علمی و پژوهشی که در دانشگاه ها و مؤسسات پژوهشی در این زمینه انجام می گیرد پشتیبانی مالی کافی به عمل آید تا بتوان از نتایج این پروژه ها بهترین استفاده را برای پیشرفت هرچه بیشتر کشورمان استفاده کنیم.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



منابع و ماخذ

فهرست منابع فارسی

- ۱ - م.راد، "جزوه مکانیک سیالات پیشرفته"، زمستان ۱۳۸۸.
- ۲ - ک.صادقی "مکانیک سیالات برای دانشجویان مهندسی مکانیک"، ناشر: موسسه آموزش عالی آزاد پارسه - موسسه فرهنگی پرسپولیس، ۱۳۸۶.
- ۳ - پایان نامه کارشناسی ارشد کیارش کیانفر، "بررسی وساخت قایق هیדרو فویل". ف. جعفرکاظمی م.راد. دانشگاه آزاداسلامی واحد تهران جنوب، ۱۳۸۱.
- ۴ - پ. کارد، ز. رنجبر، س. باستانی، ش. منتظری، "پوشش های کاهش دهنده نیروی اصطکاک".
- ۵ - ن.م. نوری، ع. سررشته داری، س. سخاوت، "مروری بر تحقیقات و دستاوردها در پدیده کاهش درگ به وسیله تزریق میکرو حباب" دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، ۶۱۳۸.
- ۶ - امیر اعظمی، منوچهر راد، بررسی جریان حول رونده های حفره زایی توسعه یافته، هفدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک ISME2009 ایران، تهران، دانشگاه تهران اردیبهشت ۱۳۸۸.
- ۷- رضا خاکی، مسعود برومند، مطالعه تجربی و عددی کاهش پسای اصطکاکی با استفاده از بهینه سازی سطح گرمایش در اجسام تقارن محوری، مجله مکانیک و هوافضا، جلد یک، شماره یک، مرداد ۱۳۸۴.
- ۸ - پایان نامه کارشناسی ارشد ابوذر ابراهیمی، گرایش مهندسی دریا، "بررسی تجربی و محاسبات شناور کاتاماران با هوا خور قیفی شکل". ع. حاجیلوی. م.راد. دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف.
- ۹ - ماهنامه اقتصاد ترابری ایران، شماره ۹۱، فروردین ۱۳۸۹، ISSN: 1827-5151.

فهرست منابع لاتین

1. Schlichting, Herrmann, "Boundary Layer Theory, Springer, 8th." 2004.
2. Irving H. Shames, "Mechanics of fluid, McGraw-Hill, 4th "2003.
3. Yunus A. Cengel and John M. Cimbala, " Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 2th".
4. John D. Anderson Jr, " Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill, 3th" .1002
5. Yasuki .Nakayama & Rober B. Feng, " Introduction to Fluid Mechanics Butterworth Heinmann 1 ."1999.



# ماہنامہ علمی تخصصی پایا شہر



6. Hubert .C."Skip"Smith," *The Illustrated Guide to Aerodynamics*, . "1992.
7. Edward L.Houghton & Peter W.Carpenter,"*Aerodynamics Butterworth Heinmann*, 5 ." 2003.
8. Clifford .Matthews, " *Aeronautical engineering Data book*, Butterworth Heinmann, 1 . " 2002.
9. Pijush K.Kundu & Ira M.Cohen, " *Fluid Mechanics*, Academic Press, 1 ."2002.
10. Frank M.White, " *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, 4 " .
11. SIGHARD F.HOERNER, " *Fluid Dynamic Drag*" 1992.
12. Frank E. Fish. " *Imaginative solutions by marine organisms for drag reduction*".Department of Biology, West Chester University, West Chester, PA 19383 USA.
13. Kodama, Y., and Kakugawa, A.,..., "Drag Reduction of Ships by Micro
14. bubbles " National Maritime Research Institute of Japan
15. Kato, H., "Skin Friction Reduction by Micro Bubbles,".
16. JEAN-PIERRE FRANC , JEAN-MARIE MICHEL "Fundamentals of
17. Cavitation"2003
18. Brian R.Kramer & Brooke C.Smith & Joseph P.Heid & Gregory K.Noffz  
& David M.Richwine & Terry .Ng, "DRAG REDUCTION
19. EXPERIMENTS USING BOUNDARY LAYER HEATING",37TH AIAA
20. Aerospace Sciences Meeting & Exhibit January 1999/Reno,NV.
21. Ronald O.Rourke, " Navy Ship Propulsion Technologies: Options for Reducing Oil Use --  
Background for Congress", DEPARTMENT OF THE NAVY—NAVAL-HISTORICAL-  
CENTER -805 KIDDER BREESE SE -WASHINGTON NAVY YARD- June 2, 2006.
22. Cengel Yunus A., Robert H. Turner and John M. Cimbala , "Fundamentals of Thermal-  
Fluid Sciences", McGraw Hill, 2. nd. Edition, 2004.
23. Munsen Bruce R., Donald F. Young, Theodore H. Okishi, "Fundamentals of Fluid  
Mechanics" ,Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
24. White Frank M., "Fluid Mechanics", Fourth Edition, McGraw-Hill Series in Mechanical  
Engineering, 2001.