خلاصه فصل یازدهم: تئوری لایه های مرزی

تئوری جریان پتانسیل قادر به پیش بینی نیروی درگ (که به ویسکوزیته سیال مربوط است) نمی باشد. برای پیش بینی نیروی درگ که به ویسکوزیته مربوط است لازم است معادلات ناویر – استوکس به همراه معادلهٔ پیوستگی، با توجه به شرایط مرزی مسئله، در اطراف جسم حل شوند. خوشبختانه در بسیاری از مسائل جریان لزج میتوان از تئوری جریان پتانسیل برای بدست آوردن توزیع فشار و از فرم تقریبی معادلات ناویر – استوکس (تقریب لایه مرزی) برای محاسبه تنش برشی استفاده کرد. با توجه به محدودیتهای این دو تئوری در جریانهایی با گرادیان فشار مثبت (که مستعد جدایی هستند) در خاتمه این بخش روش تجربی برای برآورد نیروهای آیرودینامیکی وارده بر اجسام مختلف نیز مورد اشاره قرار میگیرد. در اینجا خلاصه‌ای از مطالب گفته شده در اینبخش ارائه می‌شود:

۱) تقریب لایه‌های مرزی تنها در رینولدزهای بسیار بالا قابل استفاده است.

۲) تقریب لایه‌های مرزی با این فرض که ضخامت ناحیهٔ لزج بسیار نازک است به‌دست آمده است (لازم است شرط $\delta/x < 0.1$ برقرار باشد). نازک بودن این لایه در عمل هم ارز با بزرگ بودن رینولدز (موضعی) جریان است.

۳) در داخل لایهٔ مرزی مؤلفهٔ عمودی سرعت خیلی کوچک‌تر از مؤلفه افقی سرعت است.

۴) در داخل لایهٔ مرزی می‌توان از تغییرات فشار در راستای عمود بر سطح چشم پوشید $(\frac{\partial p}{\partial y} \approx 0)$.

۵) معادلات لایه مرزی در جریان آرام، دائم، دو بعدی و غیر قابل تراکم در اطراف هر جسمی به صورت زیر است:

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{dp}{dx}+\mu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

۶) در معادلات لایه مرزی فشار جزو معلومات نیست چون فرض بر این است که در مرحله قبل از حل جریان پتانسیل و معادله برنولی بدست آمده است.

۷) لایه مرزی آرام، دائم، دو بعدی، غیر قابل تراکم بدون هر گونه اثرات نیروی ثقل و نیز بدون هر گونه گرادیان فشار خارجی در اطراف صفحه‌ای تخت، صلب، نازک از نوع نیمه متناهی (به طول L و عرض نامتناهی) جریان بلازیوس نام دارد.

۸) در جریان بلازیوس، پروفیلهای سرعت مشابه هم هستند و می‌توان آنها را به صورت $\frac{u(x,y)}{U_\infty}=g\left(\frac{y}{\delta(x)}\right)$ بیان نمود.

۹) در جریان بلازیوس، روابط زیر برقرارند:

$$\frac{\delta}{x}=\frac{5}{\sqrt{Re_x}}$$

$$C_f=\frac{\tau_w}{\rho U_\infty{}^2/2}=\frac{0.664}{\sqrt{Re_x}}$$

$$C_D=\frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A}=\frac{1.328}{\sqrt{Re_L}}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۱۰) جریان بلازیوس در صورتیکه عدد رینولدز کل از مقدار بحرانی 5×10^5 تجاوز کند از آرام به در هم تبدیل می‌شود.

۱۱) در جریان درهم در بالای یک صفحه، برای محاسبه تنش برشی لازم است از روش انتگرال ممنتومفون کارمن استفاده شود. در مورد چنین صفحه ای، این معادله (که برای جریان آرام نیز صادق است) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau_w(x)=\rho U_\infty{}^2\frac{d}{dx}\left[\int_0^\delta \frac{u}{U_\infty}(1-\frac{u}{U_\infty})dy\right]$$

۱۲) به منظور استفاده از معادله انتگرال، لازم است شکل پروفیل سرعت حدس زده شود. در جریان آرام از پروفیل چندجمله‌ای و در جریان درهم از پروفیل توانی برای این منظور استفاده می‌شود. در این صورت این معادله تبدیل به معادله دیفرانسیلی از نوع ODE بر حسب δ ضخامت لایه مرزی می‌گردد که به راحتی قابل حل است.

۱۳) با استفاده از پروفیل توانی $\frac{u}{U_\infty}=\left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/n}$ و نیز با این فرض که $n=7$ باشد فون کارمن با استفاده از معادله انتگرال ممنتوم به روابط زیر رسید:

$$\frac{\delta}{x}=\frac{0.37}{\sqrt[5]{Re_x}}$$

$$C_f=\frac{0.058}{\sqrt[5]{Re_x}}$$

$$C_D=\frac{0.073}{\sqrt[5]{Re_L}}$$

این روابط با دقت ۱۰ تا ۱۵ درصد قادرند درگ اصطکاکی صفحات صاف (از نظر هیدرولیکی) را در جریان درهم پیش بینی نمایند (البته تا رینولدز 10^7).

۱۴) در مورد صفحات زبر، لازم است از دیاگرامهای تجربی (شبیه به دیاگرام مودی استفاده شود).

۱۵) در صورت آرام بودن جریان، ضریب اصطکاک صفحه فقط به رینولدز بستگی دارد (همچون جریان در لوله ها)

۱۶) در صورت درهم بودن جریان، زبری فقط موقعی مهم است که مقدار آن بیش از ضخامت زیر لایه لزج باشد که در چنین مواردی همواره موجب افزایش تنش برشی و درگ اصطکاکی می‌گردد.

۱۷) از روابط به‌دست آمده در بالای صفحهٔ تخت ساکن (هم در جریان آرام و هم در جریان درهم) می‌توان برای صفحات غیر مستطیلی نیز استفاده کرد. در چنین مواردی لازم است سطح جسم مورد نظر به المان‌های مستطیلی تجزیه شود و روابط برای هر المان نوشته شده و از آن انتگرال گرفته شود.

۱۸) تئوری لایه های مرزی فقط تا زمانی که پدیده جدایی رخ نداده است قادر به برآورد تنش برشی و درگ اصطکاکی است.

۱۹) ناحیه جدا شده به ناحیه‌ای در مجاورت سطح یک جسم گفته می‌شود که در آن تعدادی از ذرات سیال در خلاف جهت جریان اصلی در حال حرکت باشند. در این ناحیه تنش برشی تغییر علامت می‌دهد ولی شرط عدم لغزش همچنان برقرار است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۲۰) پدیده جدایی در جریانهایی با گرادیان فشار مثبت دیده می‌شود ولی مثبت بودن گرادیان فشار (که شرط لازم جدایی نام دارد) به تنهایی کافی نیست. در حقیقت، برای وقوع جدایی نه تنها گرادیان فشار باید مثبت باشد بلکه به اندازه کافی باید قوی نیز باشد که قوی بودن آن بستگی به پارامترهای هندسی جسم دارد (بعنوان مثال، بزرگ بودن زاویه حمله یک ایرفویل یا زاویه بازشدگی یک دیفیوزر).

۲۱) در ناحیهٔ جدا شده تئوری لایه‌های مرزی قابل استفاده نیست چون ضخامت ناحیه‌ای که تحت تاثیر قرار می‌گیرد بیش از حد بزرگ است.

۲۲) طبق تعریف، نقطهٔ شروع جدایی نقطه‌ای روی سطح جسم است که در آن تنش برشی برابر با صفر است.

۲۳) در ناحیه جدا شده، پروفیلهای سرعت همگی دارای نقطه عطف می‌باشند. در حقیقت میتوان ثابت کرد که اگر گرادیان فشار مثبت باشد پروفیل سرعت حتماً دارای نقطه عطفی در بالای دیواره میگردند.

۲۴) قبل از نقطهٔ شروع جدایی، تئوری لایه‌های مرزی همچنان قابل استفاده است مشروط بر اینکه میدان فشار جدید ناشی از حل پتانسیل جدید معلوم باشد.

۲۵) در اثر وقوع پدیدهٔ جدایی، میدان فشار در ناحیه جدا نشده نیز دستخوش تغییر می‌شود. به‌نحوی‌که حل پتانسیل در این قسمت عوض می‌شود.

۲۶) تئوری لایه های مرزی قادر است با دقت قابل قبولی نقطه شروع جدایی را پیش بینی نماید.

۲۷) در جریانهایی که با وقوع پدیده جدایی مواجه هستند لازم است برای محاسبه درگ از روشهای تجربی استفاده شود.

۲۸) کره و استوانه جزو هندسه هایی هستند که مستعد وقوع جدایی می‌باشند.

۳۰) در کره و استوانه در رینولدزهای بسیار کم (کوچکتر از ۰٫۵) جدایی نداریم. در اینحالت ضریب درگ متناسب با عکس عدد رینولدز است (چون نیروی درگ متناسب با خود سرعت است).

۳۱) در کره و استوانه با افزایش عدد رینولدز سرانجام با وقوع پدیده جدایی از نوع آرام مواجه می‌گردیم (حوالی زاویه ۸۲ درجه).

۳۲) پس از وقوع جدایی آرام، نیروی درگ متناسب با مجذور سرعت شده و در نتیجه ضریب درگ (تقریباً) مقدار ثابتی به خود می‌گیرد.

۳۳) در کره و استوانه، با افزایش بیشتر در عدد رینولدز، سرانجام جریان از آرام به درهم تبدیل می‌شود. پس از درهم شدن جریان، ممنتوم ذرات مجاور دیواره افزایش یافته و جدایی به تعویق می‌افتد (به عنوان مثال، در استوانه ناگهان به حوالی ۱۲۰ درجه منتقل می‌شود). از طرف دیگر، به علت کوچک شدن عرض شدن دنباله پشت جسم (ناحیه‌ای کم فشار) با افت ناگهانی در ضریب درگ مواجه می‌گردیم تا مجدداً ضریب درگ مقدار ثابتی به خود بگیرد.

۳۴) با زبر کردن سطح خارجی کره و استوانه، جریان در رینولدزهای کمتری از حالت آرام به حالت درهم تبدیل می‌شود. تحت چنین شرایطی، ممکن است بسته به عدد رینولدز، نیروی درگ استوانه و کره زبر (مثال: توپ گلف) کمتر از نیروی درگ استوانه و کره صاف گردد.

۳۵) در جریان در اطراف کره و استوانه نقطه شروع جدایی بسته به نوع جریان دارد. در مورد اجسامی با لبه های تیز نقطه شروع جابجایی صرف نظر از نوع جریان همواره در گوشه های تیز جسم اتفاق می‌افتد.

۳۶) پس از وقوع جدایی، درگ اصطکاکی اهمیت خود را از دست می‌دهد بنحویکه درگ کل اساساً ناشی از توزیع فشار است (که درگ فشاری یا درگ شکل نام دارد).

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

قسمت دوم

موضوع: پیشنهاد در مورد حذف برخی از فصول (یا الویت بندی آنها)

نظر اینجانب:

فصول مختلف درس مکانیک سیالات همگی مهم می‌باشند و حذف هیچکدام از آنها توصیه نمی شود. با اینوصف، امکان اولویت بندی آنها وجود دارد. این اولویت بندی بر اساس احتمال سئوال دادن از آنها در آزمون کارشناسی ارشد امسال است و بر اساس وضعیت سالهای قبل تعیین شده است. برای آن دسته از دانشجویانی که وقت کافی برای مطالعه تمام درس را ندارند توصیه می‌شود وقت خود را به ترتیب به الویتهای پیشنهادی در زیر اختصاص دهند:

الویت اول:

مباحث سینماتیکی

جریان در داخل لوله ها

تئوری لایه های مرزی

الویت دوم:

خواص سیالات

معادله برنولی

معادله ممنتوم (فرم انتگرالی)

استاتیک سیالات

الویت سوم:

آنالیز ابعادی و تشابه

تئوری جریان پتانسیل

روشهای دیفرانسیلی

مفاهیم اساسی

یادداشت:

.....

.....

.....

.....