

به نام خدا



دانشگاه فردوسی - دانشکده مهندسی - گروه مکانیک

عنوان :

بررسی کارایی و مقایسه مدل های آشفتگی در پیش بینی میزان نفوذ
آشفتگی جریان اصلی به داخل لایه مرزی

تالیف :

مهدی شفاهی

ارائه شده جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

استاد راهنما :

دکتر محسن کهرم

زمستان ۱۳۸۷

پایان نامه حاضر تحت عنوان :

”بررسی کارایی و مقایسه مدل های آشفتگی در پیش بینی میزان نفوذ آشفتگی جریان اصلی به داخل لایه مرزی“

که توسط مهندس تهیه و به هیات داوران ارائه گردیده است مورد تایید کمیته تحصیلات تکمیلی گروه می باشد.

تاریخ دفاع نمره درجه ارزشیابی

اعضای هیات داوران:

نام و نام خانوادگی	هیات داوران	مرتبۀ علمی	امضا
۱.	استاد راهنما		
۲.	ممتحن		
۳.	ممتحن		
۴.	ممتحن		

تاییدیه

گواهی می شود که این پایان نامه تا کنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن بجز مواردی که نام مرجع آورده شده است نتیجه کار پژوهشی دانشجو می باشد.

امضاء استاد

امضاء دانشجو :

راهنما:

سپاسگذاری:

بر خود لازم می دانم که پس از حمد خدای بزرگ که با لطف بی نهایت خود مرا یاری رساند، و سپاس از عنایت آن امام هما، امام رضا(ع) که بی شک الطاف او پایان بخش این پروژه بوده است؛ از جناب آقای دکتر کهرم، استاد بزرگوار محترم و مهربانم کمال قدردانی را داشته باشم.

همچنین از جناب آقای دکتر قاضی خانی دبیر محترم تحصیلات تکمیلی، جناب آقای دکتر محمود پسندیده فرد و جناب آقای دکتر حمید نیازمند، اساتید ممتحن، و کلیه اساتید گرانقدر و محترم گروه مکانیک دانشگاه فردوسی کمال سپاس را دارم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
------	-------

۲	سپاسگزاری
۳	فهرست
۵	چکیده

فصل اول : شرح مسئله و هدف پروژه

۷	۱-۱- مقدمه
۷	۱-۲- روش حل عددی و مزایای آن
۸	۱-۳- هدف پروژه
۸	۱-۴- شرح مسئله

فصل دوم : معادلات حاکم در جریان آشفته

۱۲	۲-۱- مقدمه
----	------------

۱۲	..... جریان آشفته
۱۴	..... معادلات حاکم
۱۵	..... نکاتی در رابطه با معادلات حاکم
۱۶	..... معادلات ناویر استوکس در جریان آشفته

فصل سوم : مدل های آشفته

۲۰	..... مدل های آشفته
۲۰	..... مدل های آشفته بر پایه تعریف لزجت گردابه ای
۲۳	..... مدل های صفر معادله ای
۲۴	..... مدل های تک معادله ای
۲۴	..... مدل های دو معادله ای
۲۶	..... مدل استاندارد $k-\epsilon$
۲۸	..... Realizable $k-\epsilon$ مدل
۲۹	..... RNG $k-\epsilon$ مدل
۳۰	..... مدل استاندارد $k-\omega$
۳۱	..... SST $k-\omega$ مدل

فصل چهارم : رویه حل عددی

۳۴	..... شبکه جابجا شده
۳۵	..... نحوه انفصال معادلات دیفرانسیل
۳۶	..... حل معادلات انفصال
۳۷	..... رویه حل عدی

فصل پنجم : کد اصلاح شده Teach-t

۴۲	..... مقدمه
۴۲	..... شرحی مختصر در مورد برنامه Teach-t

۴۳	..... شرایط مرزی ۳-۵
۴۳	..... شرایط مرزی ورودی ۱-۳-۵
۴۴	..... شرایط مرزی خروجی ۲-۳-۵
۴۴	..... شرایط مرزی بالایی ۳-۳-۵
۴۵	..... شرایط مرزی کنار دیوار ۴-۳-۵
۴۸	..... شرایط مرزی برای مدل های دو معادله ای ۵-۳-۵
۴۹	..... شرایط مرزی ورودی ۱-۵-۳-۵
۵۰	..... شرایط مرزی خروجی و تقارن ۲-۵-۳-۵
۵۰	..... شرایط مرزی نفوذی ۳-۵-۳-۵
۵۲	..... روند پیشرفت پروژه ۴-۵
۵۴	..... آزمون دقت برنامه کامپیوتری ۴-۵

فصل ششم: ارائه و بررسی نتایج

۵۷	..... پارامترهای مورد بررسی ۱-۶
۵۷	..... نتایج شدت آشفستگی ۱-۱-۶
۶۱	..... نتایج سرعت متوسط کنار دیواره ۲-۱-۶
۶۵	..... نتایج سرعت نوسانی به سرعت اصطکاکی ۳-۱-۶
۶۹	..... نمودارها و نتایج ۲-۶

۸۶ منابع و مراجع
----	---------------------

چکیده

در این تحقیق به مطالعه و بررسی کارایی و عملکرد پنج مدل آشفتگی در پیش بینی و تخمین صحیح مشخصه های جریان اصلی و لایه مرزی برای جریان روی یک صفحه تخت پرداخته شده است. در این پروژه نتایج حاصل از حل عددی که با استفاده از کد رایانه ای Teach-t بدست آمده اند، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده اند.

در حل عددی و مدل سازی جریان از مدل های $k-\omega$, Standard $k-\omega$, RNG $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$, Standard $k-\epsilon$, SST $k-\omega$ استفاده شده است. منطبق با نتایج آزمایشگاهی جریان های ورودی با شدت آشفتگی متفاوت از ۰.۴٪ تا ۶.۶٪ در نظر گرفته شده اند.

در ابتدا کارایی این مدل ها در پیش بینی مشخصه شدت آشفتگی از جریان اصلی مورد بررسی قرار گرفته است که تمامی مدلها نتایج قابل قبول و منطبق با نتایج تجربی بدست می دهند.

در مرحله بعد با استفاده از مشخصه سرعت کنار دیواره درون لایه مرزی سعی شده است تا کارایی این مدل ها در پیش بینی ناحیه گذر مورد ارزیابی قرار گیرد. نشان داده شده است که مدل های $k-\omega$ بهترین و دقیق ترین نتایج را بدست می دهند.

فصل اول

شرح مسئله و هدف پروژه

۱-۱- مقدمه

بررسی رفتار سیالات، عوامل و پارامترهای مؤثر بر آن همواره در قلمرو دانش از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده است و اهمیت این جایگاه هنگامی که سخن از جریان آشفته می‌شود، دو چندان می‌گردد. حدود نیم قرن پیش هنگامی که سخن از بررسی رفتار سیال به میان می‌آمد، کانون نظر محققین به نتایج و مطالعات آزمایشگاهی معطوف می‌گشت که اگر چه بعضاً دارای خطاهای بالایی نیز بود اما به ناچار مورد استفاده قرار می‌گرفت.

با گام نهادن رایانه در زندگی بشری و تحول خیره کننده حاصل از این حضور در تمامی این عرصه‌ها پژوهشگران تلاش نمودند تا رفتار سیالات را به جای انجام آزمایشهای بعضاً بسیار گران، مشکل و گاه خطرناک در قطعه‌ای کوچک و دقیق به نام CPU با مدد گرفتن از رایانه، پیش‌بینی نمایند. این مطلب و تصور اینکه مثلاً به جای ساخت یک بال هواپیما و آزمایش آن در مواجهه با جریانهای مختلف بتوان نتایج حاصله را به راحتی با مدل سازی جریان در رایانه با دقت بالا به دست آورد، در ابتدا رویایی دست نیافتنی می‌نمود. اما با سپری شدن زمان و تکاپوی محققان پرتلاش بر قامت این رویا، جامه واقعیت پوشانیده شد.

نتیجه آنکه با بهره‌گیری رایانه‌های کوچک به سادگی می‌توان به پیش‌بینی رفتار سیالات پرداخت و به خصوص رفتار جریان آشفته را که با توجه به خصیصه تصادفی بودن و درگیر بودن پارامترهای مختلف در آن

با استفاده از روشهای کلاسیک بسیار مشکل و حتی غیرممکن می‌باشد، با بهره‌گیری از روشهای عددی و رایانه‌های کوچک، مورد کاوش قرار داد.

۱-۲- روش حل عددی و مزایای آن

با توجه به توضیحات داده شده در قسمت قبل با جرأت می‌توان گفت حل بسیاری از مسایل پیچیده بدون بهره‌گیری از روشهای عددی و رایانه، کاری بس دشوار و گاه غیرممکن می‌باشد.

پژوهشگران دنیای CFD پنج مزیت عمده برای استفاده از روشهای عددی ارائه نموده‌اند [۱].

۱. کاهش عمده در زمان طراحی

۲. روشهای CFD قادر به شبیه‌سازی حالت‌های از جریان می‌باشند که با روشهای آزمایشگاهی ممکن نمی‌باشد.

۳. روشهای CFD اطلاعات بیشتر و جامع‌تری از جزئیات را ارائه می‌دهند.

۴. روشهای CFD بازده هزینه‌ای بیشتر نسبت به روشهای آزمایشگاهی دارند.

۵. روشهای CFD باعث کاهش مصرف انرژی می‌گردند.

کدهای CFD به آسانی حالت‌های پیچیده را می‌توانند بررسی نمایند، به همین خاطر بهره‌گیری از آنها جذاب می‌باشد، البته حالت‌های پیچیده حرکتی و حرارتی که معمولاً در دستگاه‌های ساخته شده به وجود می‌آیند یک پیش‌بینی درست را درباره فرآیند انتقال حرارت، بسیار مشکل می‌سازد.

امروزه کدهای تجاری CFD که براساس المان محدود بوده رو به ضعف و نزول می‌باشد و بازار به طور مستمر در اختیار چهاربرنامه Flow 3 D, Fluent, Phoenix, Star -CD قرار گرفته است که همه آنها براساس حجم محدود می‌باشند. در این پروژه نیز کد Teach-t که براساس حجم محدود بوده مورد استفاده قرار گرفته است، خاطرنشان می‌شود کد Teach-t پایه نرم‌افزار قدرتمند Fluent نیز به حساب می‌آورد و اگرچه در کد

مورد استفاده توانایی‌های کم و محدودیت‌های بسیاری نسبت به Fluent اعمال گشته بود، با این حال تلاش شده است نتایج دقیق با خطای کم حاصل گردد.

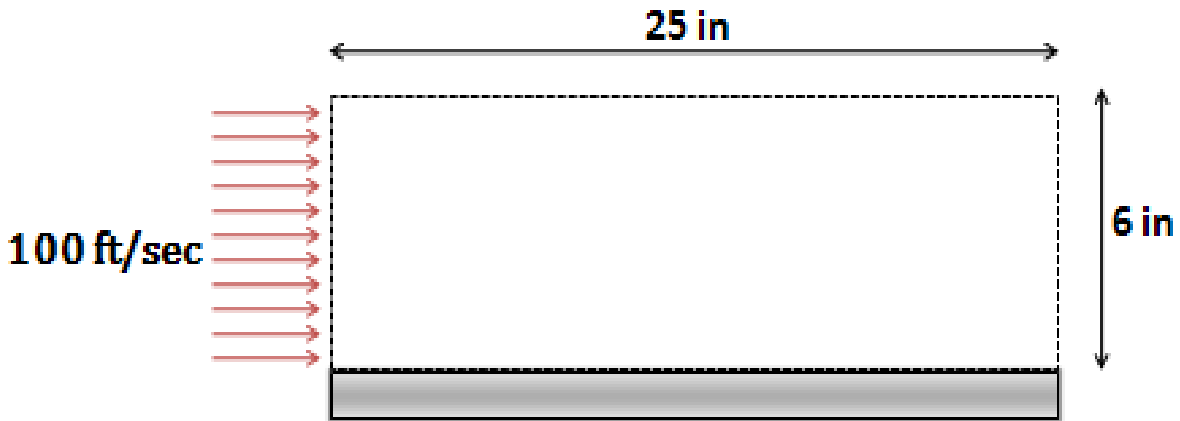
۳-۱- هدف پروژه

یکی از مهمترین پدیده‌ها در بررسی آشفتگی جریان، میزان نفوذ و تغییرات شدت آشفتگی جریان اصلی است. شبیه‌سازی‌های عددی توسط مدل‌های آشفتگی بایستی به نحوی بتوانند بخوبی این نفوذ و تغییرات را داخل جریان اصلی پیشگوی نمایند.

در این پروژه سعی شده است تا میزان دقت و کارایی چند ویرایش مختلف از مدل‌های آشفتگی دو معادله ای $K-\epsilon$ و $K-\omega$ در پیش‌بینی ناحیه گذر و تخمین پارامترهای نوسانی لایه مرزی سنجیده و با هم مقایسه شود. در این راه با استناد به نتایج تجربی [2] سعی شده تا با در اختیار داشتن نتایج مطمئن به بهترین شکل مقایسه بین مدل‌ها صورت گیرد.

۴-۱- شرح مسئله

نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی در یک تونل باد سرعت پایین را در اختیار داشتیم (شکل ۱-۱) [2] سعی شد است تا با شبیه‌سازی عددی همراه با بکارگیری مدل‌های آشفتگی مقایسه‌ای صحیح از کارایی این مدل‌ها داشته باشیم. هدف بدست آوردن اطلاعات پروسه تغییرات مومنتوم سرعتی لایه مرزی در یک ناحیه گذر طبیعی می‌باشد. جریان هوای 20 m/s باد با سرعت 100 ft/sec و به موازات یک صفحه تخت بطول 25 in حرکت می‌کند (شکل ۱-۲). بیرون از این صفحه تخت یک شبکه توری قرار داده شده است که شدت آشفتگی جریان ورودی را کنترل می‌کند، و مقادیر متفاوت شدت آشفتگی را به جریان اصلی اعمال می‌کند. اندازه‌گیری بعد از شبکه توری با توجه به سایز گره‌ها نتایج زیر را نشان می‌دهد:



شکل 1-1- صفحه تخت و جریان عبوری

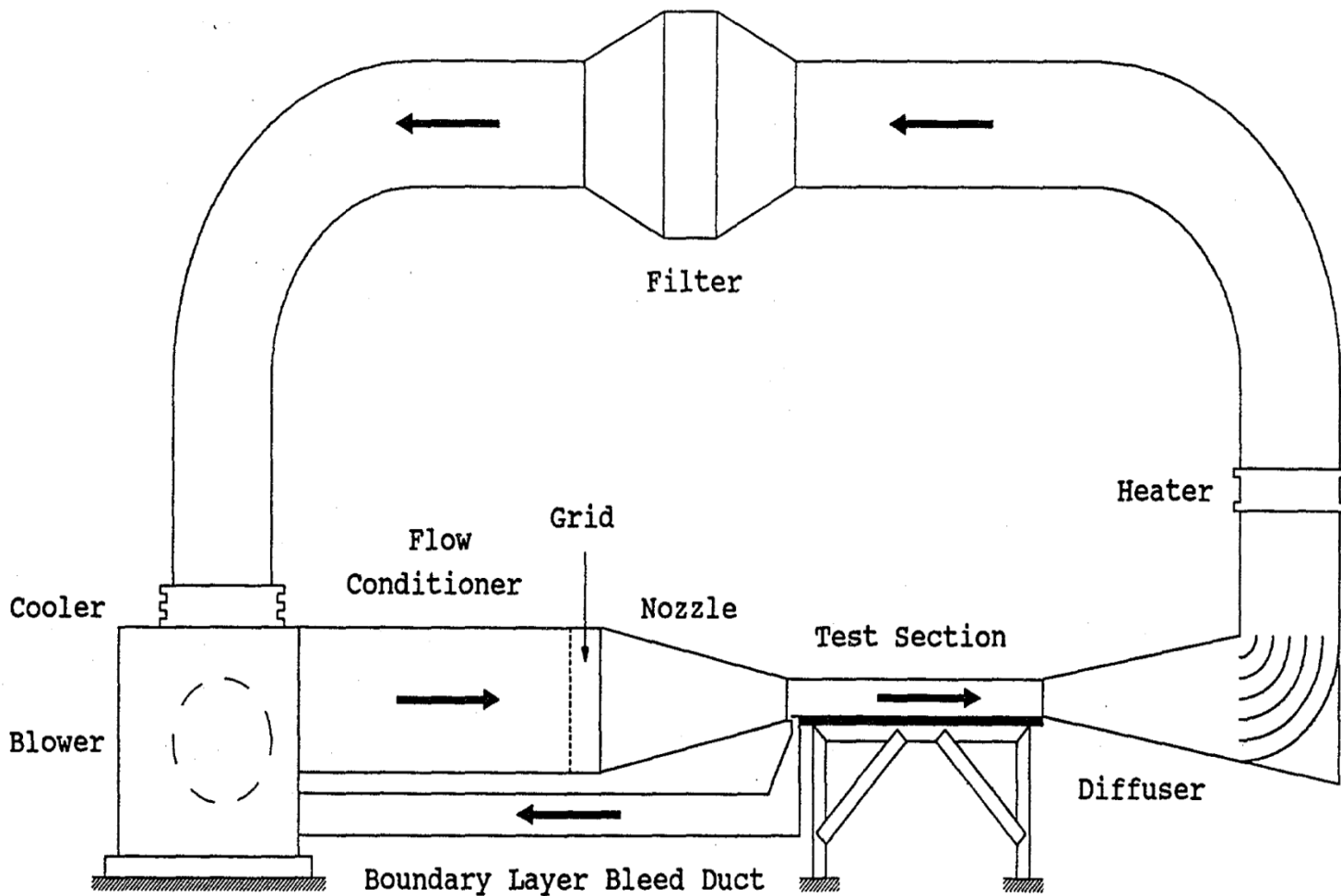
جدول (1) شدت های آشفتهگی ناشی از تورهای مختلف

شبه	شدت آشفتهگی جریان ورودی
۰	۰,۴ %
۰,۵	۰,۸ %
۱	۱,۱ %
۲	۲,۴ %
۳	۴-۵,۵ %
۴	۵,۵-۶,۶%

که $Ti = \frac{\sqrt{2/3k}}{U_{\infty}}$ است.

شدت آشفتهگی جریانی در جریان آزاد در طول مسیر تا انتهای صفحه تغییراتی دارد که مقادیر آزمایشگاهی آن را در اختیار داریم [2]، همچنین با نفوذ آشفتهگی به داخل لایه مرزی مشخصه های جریان در لایه مرزی

تغییر می کند. در پروژه پیش رو سعی بر این است تا نتایج حاصل از مدل‌های نام برده را در شرایط مشابه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کنیم و به این ترتیب مدل‌های مختلف را در پیش بینی ناحیه گذر و تخمین پارامترهای نوسانی بسنجیم و محک بزنیم.



شکل 1-2- شکل شماتیک از تونل باد مربوط به نتایج آزمایشگاهی

فصل دوم

معادلات حاکم در جریان آشفته

۴-۱- مقدمه

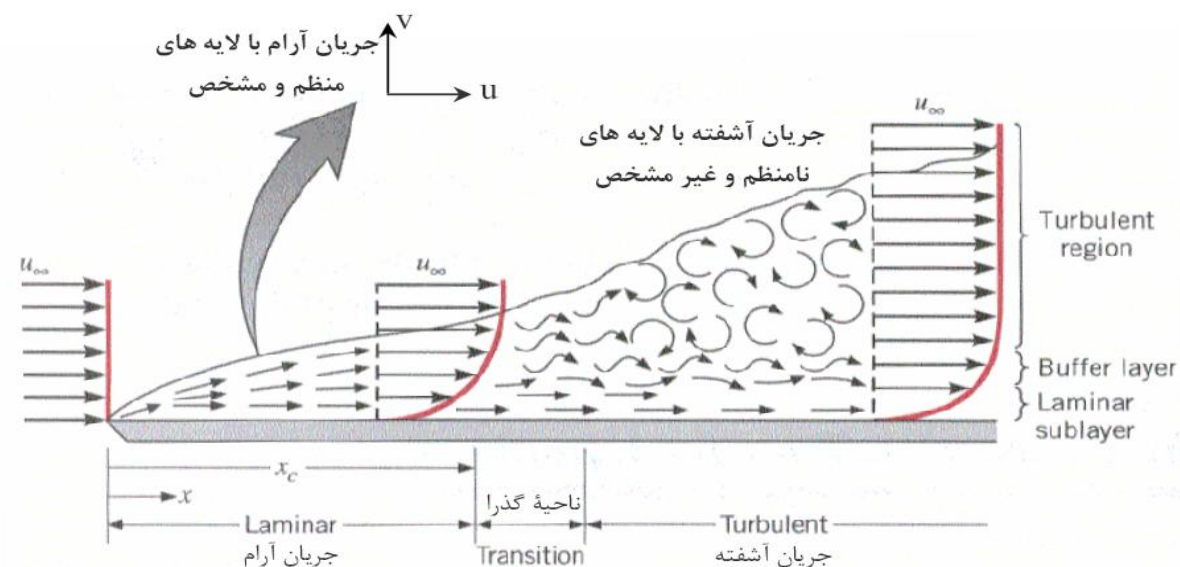
۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا بطور خلاصه توضیحاتی در رابطه با جریان آشفته داده شده است. در ادامه به معادلات حاکم بر جریان آرام و تراکم ناپذیر اشاره و سپس با پایه قرار دادن معادلات حاکم بر جریان آرام، معادلات حاکم بر جریان آشفته و غیر قابل تراکم استخراج شده است. در ادامه مدلهای آشفته استفاده شده در کد کامپیوتری شرح داده شده است. در پایان نیز درباره انتقال مومنتم و حرارت در لایه مرزی آشفته و رفتار جریان در ناحیه کنار دیوار توضیحاتی داده شده است.

۲-۲- جریان آشفته

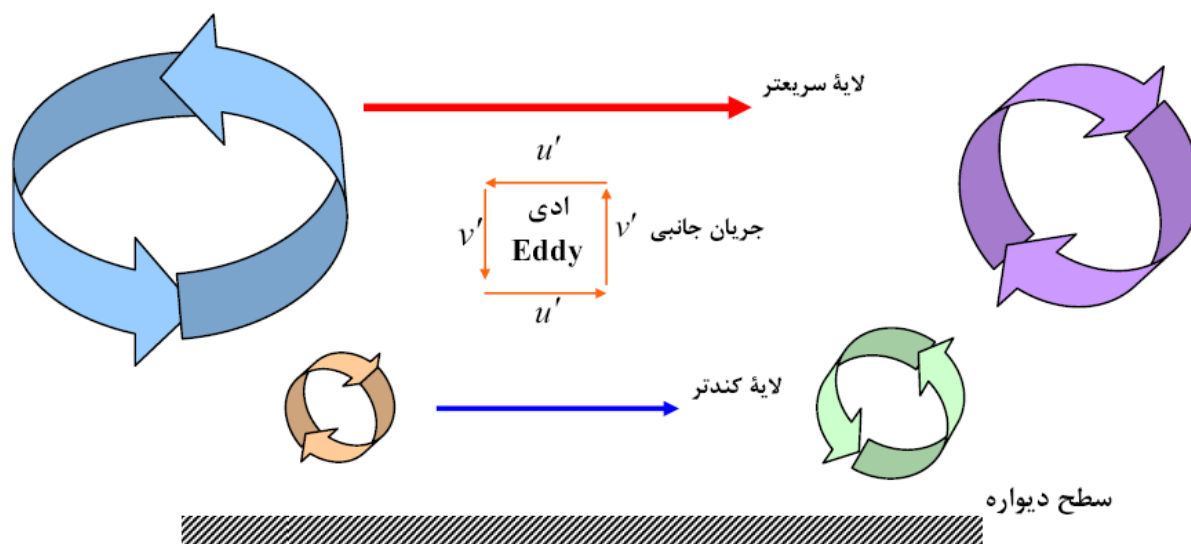
در بررسی مسائل جابجائی، ابتدا باید تعیین کنیم که لایه مرزی آشفته هست یا آرام. اصطکاک در سطح و آهنگ انتقال حرارت جابجائی شدیداً بستگی دارند به اینکه کدام یک از این دو حالت وجود دارد. تفاوت های بارزی بین جریان آشفته و آرام وجود دارد. در لایه مرزی آرام حرکت سیال خیلی منظم است و هر لایه به آرامی بر لایه مجاور خود فقط به دلیل تبادل مولکولی اندازه حرکت می لغزد. در مقابل، حرکت سیال در لایه مرزی آشفته خیلی نامنظم است و با افت و خیزهای سرعت مشخص می شود. در مقادیر رینولدز بالاتر از رینولدز بحرانی به عبارتی ناحیه جریان آشفته، رفتار جریان تصادفی و نامنظم شده و حتی با شرایط مرزی ثابت حرکت کاملاً غیر دائمی می شود. سرعت و سایر خواص جریان به صورت تصادفی و نامنظم تغییر می کند

(شکل 1-2).



شکل 1-2- رشد لایه مرزی بروی یک صفحه تخت

به جریان توربولنت به علت اتلاف شدید انرژی می بایست دائما انرژی داد و اگر این انتقال انرژی حذف شود جریان آرام می شود. در واقع می توان جریانهای توربولنت را مصرف کننده انرژی دانست. اتلاف انرژی در جریان توربولنت در ادی های کوچک صورت می پذیرد. با پیشروی جریان ادی ها زیاده تر و کوچکتر می شوند. چرخشی که این ذرات دارند باعث می شود که با سیال اطراف خود دائما در حال اصطکاک باشند. هرچه این انرژی بر اثر اصطکاک مصرف شود ادی کوچکتر می شود تا جایی که ادی می ایستد و این موقعی است که انرژی چرخشی ادی با اصطکاک برابر می شود. پس این انرژی به گرما تبدیل شده و به سیال انتقال داده می شود و انرژی داخلی سیال افزایش می یابد. هرچه انرژی ابتدایی را زیاد کنیم یعنی رینولدز را بیافزاییم این گردابه ها می توانند کوچکتر شوند و نایستند [۳] (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲-ادی ها در یک جریان آشفته و چگونگی توزیع کمیتهای فیزیکی داخل جریان

به دلیل پیچیدگی نوسانات، محاسبات عددی به صورت مستقیم در مورد جریان آشفته تنها در موارد خاصی ممکن است. یک نمونه از میدان جریان با مساحت 10 cm^2 با یک جریان آشفته و عدد رینولدز بالا عموماً شامل گردابه هایی با اندازه بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر می باشد، لذا جهت بررسی دقیق تحول در این میدان با کمک cfd نیازمند 10^9 تا 10^{12} گره می باشید. سریعترین نتایج با یک فرکانس از مرتبه ۱۰ کیلو هرتز صورت می گیرد لذا لازم است که زمان را به قدمهای حدود ۱۰۰ میکرو ثانیه تقسیم کنید، با این توضیح ذکر جمله ای از اسپزیال (۱۹۹۱) جالب است که می گوید: "برای مدل سازی مستقیم جریان آشفته در یک لوله با عدد رینولدز 500000 نیازمند رایانه ای هستیم که ۱۰ میلیون برابر از سوپر رایانه های کنونی قوی تر باشد." با این توصیف باید گفت با رایانه های امروزی توان حل مستقیم معادلات ناویر-استوکس وابسته به زمان در عدد رینولدز بالا بسیار مشکل و شاید غیر ممکن می باشد؛ اما از آنجا که به هر حال باید رفتار جریان آشفته در بسیاری از مسائل مهندسی پیش بینی گردد از این رو پژوهشگران cfd بهره گیری از میانگین زمانی خواص جریان را برای این مهم در نظر گرفته اند [۵،۴].

در این شرایط مؤلفه های سرعت، دما و فشار یک مقدار میانگین و یک مقدار نوسانی پیدا می کند:

(۱-۲)

$$U = \bar{U} + u'$$

$$V = \bar{V} + v'$$

$$T = \bar{T} + t'$$

نوسانات تلاطمی بطور شدیدی با حرکت متوسط کوپل هستند، وقتی که تلاش می کنیم تا معادلات را برای

حرکت متوسط با متوسط زمانی گرفتن از معادلات ناویر-استوکس بنویسیم، ترمهای اضافی ظاهر می شوند

که با حرکت نوسانی معین می شوند. این ترمهای اضافه شده، مجهولات را برای محاسبه حرکت متوسط، زیاد می کنند. در نتیجه پس از شکل دهی به معادلات ناویر استوکس متوسط زمانی گرفته شده، مجهولاتی به تعداد بیشتر از معادلات ظاهر می شوند. به منظور بسته کردن سیستم معادلات حرکت متوسط، به معادلات اضافی نیاز داریم که ارتباط دهنده میان ترمهای اضافی ناشی از حرکت نوسانی و میدان سرعت حرکت متوسط باشند. استخراج این معادلات برای بسته کردن سیستم معادلات "مدلسازی آشفتگی" نامیده می شود و مساله اصلی در محاسبات حرکت متوسط در جریانهای آشفته به شمار می رود [3].

در ادامه ابتدا معادلات حاکم بر جریان آرام و سپس معادلات حاکم بر جریان آشفته، با توجه به مشخصه نوسانی جریان آشفته ارائه و روند ایجاد مدلسازی در جریان آشفته بیان خواهد شد.

۲-۳- معادلات حاکم

برای بررسی هر نوع حرکتی ابتدا باید معادلات حاکم بر آن را مشخص کرد. معادله کلی حاکم بر حرکت، بر پایه قانون دوم نیوتن می باشد. حالت خاص این معادله برای حرکت سیال، معادلات ناویراستوکس می باشد. با توجه به هدف پروژه، معادلات برای یک صفحه تخت، با دمای ثابت در حالت دوبعدی مورد نیاز می باشند. برای این منظور محور x مختصات را در جهت طول صفحه، و محور y مختصات را عمود بر صفحه در نظر می گیریم.

از اصل بقای جرم، معادله پیوستگی بصورت زیر بدست می آید:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2-2)$$

معادله (۲-۲) با فرض ثابت بودن چگالی و غیر قابل تراکم بودن سیال بدست آمده است. معادلات ناویر-استوکس یا معادلات حرکت سیال از قانون دوم نیوتن که همان اصل بقای اندازه حرکت می باشد در دو

راستای x و y ، به شکل زیر بدست می آید:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3-2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4-2)$$

این معادلات با فرض جریان پایا، آرام، ثابت بودن خواص سیال از جمله چگالی و لزجت و عدم وجود نیروهای جسمی و خارجی بدست آمده است.

از معادله انرژی (قانون اول ترمودینامیک) در جریان آرام و شرایط پایدار با خواص ثابت سیال داریم:

$$\frac{\partial}{\partial x} (uT) + \frac{\partial}{\partial y} (vT) = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5-2)$$

که با توجه به معادله پیوستگی بصورت زیر بدست می آید:

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (6-2)$$

پس مجهولات ما در جریان آرام عبارتند از: u, v, p, T .

۴-۲- نکاتی در رابطه با معادلات حاکم

در قسمت قبل معادلات حاکم بر جریان آرام معرفی گردید. این معادلات از مرتبه دوم بوده و شکل کلی آنها از لحاظ ریاضی بصورت زیر می باشد:

$$a \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + d \frac{\partial \phi}{\partial x} + e \frac{\partial \phi}{\partial y} + f \phi + g = 0 \quad (7-2)$$

اگر ضرایب معادله ثابت و یا تابعی از متغیرهای مستقل باشند، معادله خطی است. ولی همانطور که مشاهده می شود معادلات مومنتم غیر خطی می باشند و برای حل نیاز به روش تکرار دارند.

یک مفهوم مهم دیگر در مورد معادلات، بیضوی (elliptic)، سهموی (parabolic) و یا هذلولی (hyperbolic)

بودن معادلات است. تشخیص این مورد به طریق زیر صورت می گیرد [6]: