**فصل اول: معرفی CFD**

برای حل جریان حول یک هندسه دلخواه از این روش ها استفاده می شود:

-روش تجربی -روش تحلیلی -روش عددی یاCFD

هر یک از این روش ها کاربرد خاص خود را دارد و از مزایا و معایب خود برخوردار است.در روش تجربی از آزمایشگاه و تونل باد گرفته تا تست های واقعی پرواز استفاده می شود تا جریان حول یک هندسه معلوم شناسایی شود.این روش معمولا گران است و نیاز به این دارد که یک نمونه از جسم ساخته شود.با این حال روش دقیقی است و برای روش های دیگر داده هایی را فراهم می کند تا صحت آنها سنجیده شود .برای معرفی روش های تحلیلی و عددی ابتدا قوانین حاکم بر دینامیک سیالات بررسی می شود.هر نوع جریان و هر نوع هندسه که درنظر گرفته شود قوانین حاکم بر جریان آن عبارتند از:

بقای جرم:

بقای ممنتوم:

علاوه بر این دو قانون ، قانون بقای انرژی نیز هست.در حالت کلی این سه قانون یک دستگاه معادلات جفت شده غیرخطیPDE هستند که تا به حال برای آنها حل تحلیلی پیدا نشده است.در روش تحلیلی با اعمال یک سری فرضیات ساده کننده حول اجسام و هندسه های غالبا ساده این معادلات ساده می شوند و با حل آنها خصوصیات جریان معلوم می شود . ولی این ساده سازی ها اغلب آنقدر زیادند که در عمل کاربرد چندانی ندارند و بطور غیرمستقیم استفاده می شوند. در روش CFD سعی می شود با استفاده از سرعت محاسبه بالای رایانه بدون آنکه معادلات بقا زیاد ساده شوند دستگاه این معادلات حل شود. این روش که از تولد آن بیش از چند دهه نمی گذرد یکی از لوازم طراحی اجسام مختلف شده است.

**کاربردCFD:**

-کمک به طراحی اجسام پرنده

-کمک به پیشرفت مهندسی پزشکی

-کمک به شناسایی جریان های بین رشته ای

-کمک به تخمین سریع جریان در طرح های تجاری

**قسمت های یک حل باCFD:**

الف) پیش پردازش:

1-تعیین و شناسایی هندسه

2-تولید شبکه

3-انتخاب مدل فیزیکی

4-انتخاب روش محاسباتی

ب) حل عددی میدان جریان:

نوشتن برنامه کامپیوتری

بدست آوردن نتایج بصورت اعداد

پ) پردازش نتایج:

نمایش نتایج بصورت نمودار،چارت، فیلم

تجزیه و تحلیل نتایج

تهیه گزارش

**روش کار در CFD:**

 ساختار برنامه هاي CFD روش عددي است، الگوريتمهاي عددي شامل مراحل زير مي باشند :

* انتگرال گيری از معادلات حاكم بر جريان سيال روي تمام حجمهاي كنترل مربوط به ميدان حل
* گسسته سازي؛ شامل جايگذاري نوعي از تقريبهاي اختلاف محدود براي عبارتهاي داخل معادلة انتگرالي مي باشد، كه فرآيندهاي جريان مثل جابجايي، نفوذ و چشمه ها را نشان مي دهد. اين عمل معادلات انتگرالي را به يك سيستم معادلات جبري تبديل مي كند
* حل معادلات جبري با استفاده از يك روش تكرار

هدف این است که قوانین بقا بصورت عددی در یک فضای گسسته حل شوند.منظور از فضای گسسته شبکه و گره هایی است که در آنها معادلات حل و خصوصیات بدست آیند.

سه ایده ریاضی در مشخص کردن کارایی یا عدم کارایی هر یک از الگوریتم ها مفید است: همگرایی، سازگاری و پایداری.همگرایی خاصیتی از روش عددی برای بدست آوردن جوابی است که به حل دقیق نزدیک باشد.طرح های عددی سازگار ، دستگاهی از معادلات جبری را ایجاد می کنند که می توان نشان داد با معادله حاکم اصلی زمانیکه فاصله شبکه به سمت صفر میل می کند ، معادل می باشد. پایداری در روش عددی با میرایی خطاها همراه می باشد.

فرایندهای جریان شامل اثرات ناشی از جابجایی و نفوذ هستند.پدیده های نفوذ در تمام جهات بطور مساوی اثر می گذارند اما پدیده های جابجایی منحصرا شامل نفوذ در جهت جریان هستند.

**فصل دوم: قوانین بقا در حرکت سیال و شرایط مرزی**

**بقای جرم در حالت 3 بعدی:**



نرخ خالص جریان جرم ورودی به المان سیال= نرخ افزایش جرم در المان سیال

نرخ افزایش جرم در المان سیال برابر است با:

نرخ خالص جریان جرمی ورودی به المان:

با برابر قرار دادن دو رابطه بالا:

برای سیالات غیرقابل تراکم:

**نرخ های تغییر مربوط به یک ذره سیال و یک المان سیال:**

اگرΦ یک خاصیت ذره سیال در واحد جرم باشد:

نرخ تغییرات در واحد حجم بصورت زیر می باشد:

افزایش برای یک ذره سیال = نرخ خالص جریان خروجی از المان سیال + نرخ افزایش برای المان سیال

**معادله اندازه حرکت در حالت سه بعدی:**

برایند نیروهای موثر بر ذره سیال=نرخ افزایش اندازه حرکت ذره سیال

دو نوع نیرو بر ذزه سیال وارد می شود:

1)نیروهای سطحی: فشاری، لزجت

2)نیروهای بدنه ای: گرانشی، گریز از مرکز

نیروی خالص در جهت x برابر است با برآیند مولفه های نیروهایی که در همان جهت روی المان سیال عمل می کنند.



مولفه x معادله اندازه حرکت ، با مساوی قرار دادن نرخ تغییرات اندازه حرکت ذره سیال با نیروی کلی در جهت x ناشی از تنش سطحی بعلاوه نرخ افزایش اندازه حرکت ناشی از چشمه ها بدست می آید.

مولفه های yو z نیز بهمین ترتیب بدست می آید.

**معادله انرژی در حالت سه بعدی:**

**کار انجام شده بوسیله نیروهای سطحی:**

نرخ کل کار انجام شده در واحد حجم بوسیله تنش سطحی:

**نرخ خالص انتقال حرارت به ذره سیال:**



در جهت x داریم:

به همین ترتیب در راستای yو z داریم:

نرخ کلی گرمای افزوده شده به ذره سیال در واحد حجم:

**معادله انرژی:**

**معادلات ناویر-استوکس برای سیال نیوتونی:**

 در جهت x:

**صورتهای دیفرانسیلی و انتگرالی معادلات کلی انتقال:**

با بکار بردن قضیه دیورژانس داریم:

**طبقه بندی رفتار فیزیکی:**

مسائل تعادل : بسیاری از این مسائل با معادلات بیضوی بررسی می گردد.

مسائل نفوذ: این مسائل تحت معادلات سهموی یا هذلولوی قابل توصیف اند.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| نوع مسئله | نوع معادله | شکل معادله | شرایط | میدان حل | روند حل |
| مسائل تعادل | بیضوی |  | شرایط مرزی | میدان بسته | همواره ملایم |
| مسائل همراه با استهلاک | سهموی |  | شرایط اولیه و مرزی | میدان باز | همواره ملایم |
| مسائل بدون استهلاک | هذلولوی |  | شرایط اولیه و مرزی | میدان باز | ممکن است ناپیوسته باشد |

**فصل سوم: آشفتگی و مدل کردن**

**جريان آشفته:**

همانطور که از نام اين جريان مشخص است، اين جريان رفتاری بسيار اتفاقی و بی سازمان دارد. در اين جريان، به واسطة فرآيندهای اختلاطی شديد، جزء در نواحی بسيار نزديک به ديواره، شکل لايه های جريان به راحتی قابل تشخيص نبوده و مولکولهای سيال مسير مشخصی را طی نمی کنند. به عبارت ديگر جريان آشفته نوعی از جريان سيال است که در آن سيال تحت نوسانات جريانی و فرآيندهای اختلاطی شديد قرار ميگيرد،اين رفتار بر خلاف رفتار جريان آرام است که در آن جريان سيال تحت لايه ها و مسيرهای مشخص حرکت می نمايد. در يک جريان آشفته، اندازة سرعت در هر نقطه دائمًا تحت نوسانات و تغييرات، هم در اندازه و هم در راستای حرکتی، قرار می گيرد، به طوريکه تشخيص موقعيت هر ذره در داخل ميدان جريان و نيز در هرلحظه مشکل می باشد. همين وضعيت نوسانات دائمي و غير مشخص در اندازة سرعت را مي توان در اندازة فشار، دما و چگالي هر نقطه مشاهده نمود. البته نوسانات اندازة چگالي تنها در جريانهای تراكم پذير و يا

جريانهای درگير با انتقال حرارت جابجائي آزاد مشاهده مي گردد.

به طور کلی يک جريان آشفته دارای خصوصيات ذيل ميباشد:

١‐ بی نظمی مکانی و زمانی

٢- طيف پيوستة مکانی و زمانی

٣‐ رينولدزهای بالا( معمولا)

٤‐ اضمحلال افزايش يافتة انرژی و ممنتوم

٥‐ اختلاط افزايش يافته و انتقال حرارت افزايش يافته و ضريب پساي پوسته اي افزايش يافته

٦‐ سه بعدی بودن ( حتی در جريانهايی که ظاهرًا دو بعدی می باشند)

٧‐ حرکات غالب ورتيسيتال

٨‐ تناوبی بودن

**راه تشخيص آرام يا آشفته بودن يک جريان چيست؟**

برای رسيدن به جريان آشفته بالاخص بر روی سطوح جامد و در داخل کانالهای باز و يا لوله ها، ابتدا جريان بايستی از حالت آرام ، وارد مرحلة گذر از حالت آرام به آشفته و در نهايت وارد فاز جريان آشفته گردد.

گذر از حالت جريان آرام به آشفته در طی فرآيندی رخ می دهد که در آن هسته ها و نطفه های محلی آشفتگی آنقدر بر روی هم جمع انباشته می شوند که تمام ميدان جريان را پر می کنند.

به اين فرآيند تدريجی انباشته شدن توده های محلی آشفتگی بر روی هم، فرآيند گذر از حالت جريان آرام به آشفته گفته می شود. برای گذر از حالت جريان آرام به آشفته، مسافت و زمان مشخصی نياز است تا تمام جريان از هسته های آشفتگی اشباع گردد.



چنانچه میزان آشفتگی موجود در جریان آزاد بالا برود ویا آنکه زبری سطح افزایش یابد می توان انتظار داشت که گذر از حالت آرام به آشفته در مسافتی کوتاهتر و به عبارت ديگر سريعتر رخ دهد و بالعکس.ميزان آشفتگي موجود در جريان آزاد را مي توان به صورت نطفه هاي آشفتگي موجود در جريان آزاد در نظرگرفت كه چنانچه اين نطفه ها در فضاي مساعد براي رشد و نمو قرار گيرند، مي توانند باعث آشفته شدن جريان گردند. معمولا برای تشخيص آرام يا آشفته بودن جريانات مهندسی از اعداد بدون بعد استفاده می شود. در جريانات جابجائی اجباری تک فاز، معمولا عدد رينولدز معيار تشخيص جريان آرام يا آشفته می باشد.

**تحليل پايداري جريانات آرام:**

براي آنكه نشان دهيم آيا يك جريان آرام در مقابل اغتشاشات محيطی پايدار مي باشد و يا نه، لازم است كه از تحليل پايداري استفاده نمائيم. مراحل كلي براي تحليل پايداري يك جريان عبارتند از:

١‐ يك جواب فيزيكي براي حالت جريان متوسط مسالة مورد نظر فرض نموده و آنرا با *U* نمایش دهید. ( به عبارت بهتر ميدان جريان را برای جريان متوسط به دست آوريد )

٢‐ يك متغير اغتشاشی مانند *U*′به اين جواب فرضي اضافه نموده و مجموع *U* +*U*′را در داخل معادلات حاكم بر جريان سيستم جايگذاري نمائيد.

٣‐ از معادلات حاصله، معادلة حاكم بر جريان با جواب حالت متوسط *U* را كسر نمائيد. آنچه باقي ميماند را اصطلاحًا معادلة اغتشاشي مي نامند. معادلة به دست آمده، معادلة انتقال اغتشاش در

داخل جريان مزبور نيز ناميده می شود.

٤‐ با فرض كوچك بودن اغتشاشات مورد نظر، معادلة اغتشاشي حاصله را خطي نمائيد؛ بدين معنا كه ازترمهاي داراي ضريبي از *U*′صرفنظر نمائيد.

٥‐ چنانچه معادلة اغتشاشي حاصله كماكان پيچيده باقي مانده است، مي توان با فرض اغتشاشات ساده( نظير امواج متحرك اعم از امواج سينوسی و غيره)، معادلة اغتشاشي حاصله را باز هم ساده نمود.

٦‐ معادلة اغتشاشي ساده شده را براي تعيين رفتار *U*′حل نموده تا به مقادير ويژة آن دست يابيم ودر ادامه با استفاده از جواب به دست آمده تعيين نمائيد كه آيا اندازة *U*′نسبت به زمان يا مكان رشد مي نمايد ( جريان ناپايدار و مستعد براي آشفته شدن)، يا آنكه اندازة *U*′نسبت به زمان يا مكان ثابت باقي مي ماند( جريان داراي پايداري خنثي ) و يا آنكه اندازة*U*′ نسبت به زمان( يا مكان) كاهش مي يابد ( جريان پايدار و مستعد براي ميرا نمودن اغتشاشات محيطی و حفظ حالت

آرام و يا ميرا نمودن آشفتگي هاي موجود در جريان ).

٧‐ با استفاده از تحليل مشابه می توان چرائی و چگونگی آشفته شدن جريان در نواحی دور ازديواره وآرام ماندن جريان در نزديکی ديواره را توضيح داد. در نواحی با عدد رينولدز موضعی پائين, جريان پايدار بوده و ترمهای اغتشاشی ميرا می شوند. در نواحی با عدد رينولدز بالا جريان ناپايدار بوده وترمهای اغتشاشی رشد می نمايند. در نواحی با عدد رينولدز متوسط, جريان دارای پايداری خنثی بوده و اغتشاشات موجود در جريان می توانند پايدار باقی بمانند. به عبارت ديگر در هر ناحيه از يک جريان, پتانسيل برای رشد, حفظ و يا ميرا شدن دامنة اغتشاشات متفاوت می باشد. اين پتانسيل به شدت وابسته به اعداد بدون بعدی نظير عدد رينولدز يا عدد رايلی و عدد وبر و يا حتی شرايط سطحی مي باشد. لازم به ذکر است که رشد اغتشاشات هم می تواند تابعی از زمان و هم تابعی ازمکان باشد

. 

**تئوری پايداری غير لزج:**

يک حالت خاص از جريانات( که در عين حال حالتی آموزنده از جريانات سيال می باشد)، جريانی با عددرينولدز بی نهايت يا با ويسکوزيتة ناچيز می باشد که در آن می توان از ترم ويسکوز معادلة اور‐ سامرفيلدصرفنظر نمود. در نتيجه به معادلة حاکم بر اغتشاشات غير لزج خواهيم رسيد:



چند تئوری مهم راجع به تئوری پايداری غير لزج وجود دارد که در ذيل بدانها اشاره خواهد شد:

**تئوری ١:** برای ناپايداری لازم است که پروفيل سرعت دارای نقطة عطف باشد.

**تئوری ٢:** حتی با وجود نقطة عطف در داخل پروفيل سرعت، باز هم لازم است که در تمام نقاط پروفيل باشد که در اين رابطه سرعت در نقطة عطف می باشد.

با استفاده از تئوری ١ رايلی می توان اينطور اظهار نمود که اغلب پروفيلهای سرعت واقعی

(پروفيلهای مربوط به جريان لزج) که بدون نقطة عطف در داخل پروفيل سرعت خود می باشند، پايدار باقی می مانند. از اين دسته پروفيلها می توان به پروفيل سرعت توسعه يافته در جريانات محصور( کانال يا لوله) و نيز پروفيل سرعت در لاية مرزی جريانات دارای گراديان فشار مطلوب  اشاره نمود.

پرانتل نشان داد که بر خلاف تصور همگان، ويسکوزيته می تواند به جای ميرا نمودن اغتشاشات، گاهًا ميتواند باعث ناپايدار شدن برخی از طول موجهای خاص اغتشاشی در برخی از اعداد رينولدز مشخص گردد. شکل زيرچهار پروفيل سرعت مختلف را نشان می دهد که از نقطه نظر ناپايداری غير لزج مورد بررسی قرار گرفته اند.از نقطه نظر ناپايداری غيرلزج, سه پروفيل اول به صورت نامشروط پايدار ميباشند. تنها پروفيل چهارم استکه بر مبنای تئوری ٢ احتما لا ناپايدار می باشد. البته لازم به ذکر است که هر چهار پروفيل مزبور در برخی اعداد رينولدز خاص دارای ناپايداری لزج می باشند( ناپايداری ناشی از فعال شدن برخی از طول موجهای غير فعال در تئوری جريان غير لزج ).



**چگونگی تشکيل ادی ها :**

يک جريان آشفته را در نظر بگيريد. به واسطة حرکات اتفاقی و نامنظم ذرات در يک جريان آشفته و وجود اغتشاش در جريان( که دارای سرعت مقياسهای مختلف از چند درصد سرعت متوسط تا صددرصد اندازة سرعت متوسط مي باشد )، گاهًا در امتداد عمود بر راستای جريان اصلی، يک سری جريانات جانبی رخ می دهد. به واسطة اين عمل، ممنتوم لايه های نزديک ديواره (که به واسطة ذات اضمحلالي جريان آشفته بخشی از انرژی آنها از دست رفته است ) به طور دائمی توسط لايه های پرانرژی بالاترRefresh می گردد و همين امر باعث می شود که بخشی از ممنتوم از دست رفتة سيال مجاور ديواره توسط لايه های پرانرژی بالاتر جبران گردد.

نتيجة ديگر حرکات اتفاقی و نامنظم جريان در جهت عمود بر جريان، تشکيل ادی می باشد. با در نظرگرفتن اين اصل که همواره هر ذرة متحرک سيال تمايل به حفظ ممنتوم خود دارد، وقتی به واسطة يک اغتشاش كوچك ذره ای از سيالِ داخل لاية مرزی بدون وجود پتانسيل لازمه( و تنها تحت اثر ذات ناپايدار جريان ) از لاية با ممنتوم کم به لاية با ممنتوم بالا جهش مينمايد، برای حفظ و بازگشت ممنتوم ذره به مقدار اولية خود، ذره در موقعيت جديد خود، حرکتی را در مقياس کوچک ولی در خلاف جهت ممنتوم لاية مزبور انجام ميدهد تا ممنتوم افزايش يافته مجددًا تا حدی به ممنتوم اولية خود کاهش يابد.. مجموعة اين نوع حرکات در کنار تمايل جريان به حفظ قانون پيوستگی، منجر به تشکيل ادی می گردد. همين توصيف در مورد ذراتي كه از لاية با ممنتوم بالا به لاية با ممنتوم پائين منتقل مي گردند و در نهايت باعث تشکيل ادی می گردند نيز صحيح مي باشد.

به بيان ديگر، وقتی بخشی از جريان به صورت جانبی به لايه های پائينتر منتقل می گردد، در همين زمان برای جلوگيری از تجميع ذرات در لاية تحتانی و به واسطة قانون پيوستگی جرم، حرکت مشابهی درجهت مخالف بايستی رخ دهد تا سيال کندتر را به سمت سيال سريعتر منتقل نمايد تا در آن قسمت شتابدهی شود. مجددًا برای جلوگيری از تجمع ذرات فقط در دو نقطه لازم است که حرکات مشابهی در راستای جريان اصلی نيز رخ دهد. مجموعة اين فرآيندهای انتقال ممنتوم منجر به تشکيل ادی ها در جريانات آشفته ميشود.

وجود گراديان سرعت متوسط شرط لازم برای تشکيل اديها و تبديل جريان آرام به آشفته می باشد. لذا در مدلسازی های جريانات آشفته بايستی نواحی دارای گراديان سرعت متوسط(بالاخص نواحی مجاور ديواره و يا نواحی داخل گردابه ها و جريانات جدايشی ) به دقت مدلسازی گردند تا بتوان رژيم دقيقی از جريان آشفته را مدل نمود.

**اثر آشفتگی روی معادلات میانگین زمانی ناویر- استوکس**

**متوسط گيری جمعی:**

برای فهم مفهوم اين نوع متوسط گيری، يک آزمايش جريان آشفته را که شرايط آن کام ً لا تکرار پذير است را در نظر بگيريد. چنانچه آزمايش را N بار انجام داده و مقادير ميدان ηرا در لحظة *ts* در هر آزمايش اندازه گيری نمائيم، مجموعه ای از N عدد مقادير لحظه ای ηرا خواهيم داشت. متوسط جمعی عبارتست از:



**متوسط گيری زمانی:**

در اين نوع متوسط گيری، برای يک آزمايش، مقادير ميدان ηرا در طی زمان آزمايش اندازه گيری نموده و از مقادير ثبت شده نسبت به زمان متوسط می گيريم:



در تعريف متوسط گيری زمانی, دامنة زمانی Δ*t*در مقايسه با زمان مقياس حرکت آشفته و يا به عبارت بهتر در مقايسه با مقياس زمانی آرامترين تغييرات در خاصيت ηکه بواسطة حضور بزرگترين اديها ميباشد، بسيار بزرگ است. اما در مسائل گذراء Δ*t*بايستی نسبت به زمان مقياس نظير ميدان جريان متوسط کوچکتر باشد. به بيان ديگر, تقسيم زمانی مساله بايستی به نحوی صورت پذيرد که رفتار گسسته و در عين حال نزديک به فيزيک مساله به دست آيد.

مجموعه قوانين ذيل در زمينة متوسط گيری مفيد واقع خواهند شد. چنانچه a و b را مولفه های نوسانی و c را به عنوان عدد ثابت در نظر بگيريم, به مجموعه قوانين رينولدز خواهيم رسيد:



که در آن

مقدار متوسط کميتهای نوسانی صفر می باشد, يعنی

برای اندازه گيری تجربی مولفه های نوسانی سرعت از تعریف می توان استفاده نمود:



**معادلة پيوستگی برای جريان آشفته:**





برای يک جريان تراکم ناپذير, از آنجا که



**معادلة ممنتوم برای جريانات آشفته:**

معادلات ممنتوم برای يک جريان تراکم ناپذير با ويسکوزيتة ثابت به صورت زير می باشد:



اين معادله هم برای جريانات آرام و هم برای جريانات آشفته معتبر می باشد. ليکن برای يک جريان آشفته,متغيرهای وابسته ای نظير سرعت و فشار تمامًا وابسته به زمان می باشند.

حال می خواهيم معادلة ممنتوم فوق را بر حسب کميتهای متوسط زمانی بيان نمائيم. با قرار دادن



 





از معادلة پيوستگی جريانات تراکم ناپذير,



با اضافه و کم نمودن ترم ( که مساوی صفر می باشد) به طرفين معادلة به دست آمده برای ممنتوم, و از آنجا که:



معادلة ممنتوم برای جريان آشفته به صورت زير بيان می گردد:



تنها تفاوت معادلة ممنتوم حاصله با معادلة ممنتوم با کميتهای لحظه ای, اضافه شدن ترم آخر در سمت راست معادله يعنی می باشد. اين ترم را اصطلاحًا تنش آشفتگی يا تنش رينولدز می ناميم. تنها تفاوت معادلات جريان آرام با آشفته نيز فقط حضور همين ترم می باشد. به طور کلی اين ترم, از لحاظ فيزيکی يک تنش نمی باشد, بلکه بيانگر اثر تبادل اينرسی( ممنتوم) می باشد. فراموش نکنيم که اين ترم ازسمت راست معادلة ممنتوم ( جائيکه با ترمهای اينرسی سروکار داريم ) به سمت چپ منتقل شده است. بنابراين ريشه و بنياد اين ترم از جنس ممنتوم می باشد.

**بررسی جريانهای نزديک ديواره ومفهوم توابع ديوار:**

توابع ديواره در حقيقت پروفيلهای تحليلی جريان در لاية مرزی مجاور ديواره هستند که با استفاده از روشهای تحليلی و از حل صريح معادلالات جريان در نزديکی ديواره ( پس از اعمال برخی فرضيات ساده کننده بر روی معادلات حاکم بر لاية مرزی مجاور ديواره ) به دست آمده اند، و از آنجا که به صورت تحليلی به دست آمده اند، ديگر خطاهای موجود در روشهای عددی ( که ذات تمام روشهای عددی و روشهای گسسته سازی ميدان جريان هستند ) در پروفيلهای توابع ديواره به چشم نمي خورند. بنابراين مزيت استفاده از توابع ديواره را می توان به صورت ذيل دسته بندی نمود:

١‐ کاهش حجم محاسبات به واسطة عدم نياز به شبکه بندی در نواحی نزديک ديواره

٢‐ افزايش دقت محاسبات ( برای مسائل نه چندان پيچيده)

آزمايشات بی شماری نشان داده اند که ناحية نزديک ديواره را می توان به ٣ لاية مجزا تقسيم نمود. درداخلی ترين لايه، که اصطلاحًا زيرلاية لزج ناميده می شود، جريان اغلب شبيه جريان آرام می باشد، يعنی در اين ناحيه، ديفيوژن مولکولی نقش غالب را در انتقال ممنتوم و انتقال حرارت بر عهده دارد. خارجی ترين لايه که اصطلاحًا لاية تمام آشفته ناميده می شود، ادی ها نقش غالب را در انتقال ممنتوم و حرارت بر عهده دارند. در بين اين دو ناحيه، ناحيه ای به نام لاية گذراء يا ميانی يا لاية محافظ وجود دارد که ديفيوژن مولکولی و اديها از اهميت يکسان برخوردار می باشند. چنانچه کميتهای بدون بعد و به صورت زير تعريف گردند:



در تعريف فوق يک سرعت مشخصه برای جريان آشفته و سرعت مشخصة بی بعد برای جريان آشفته می باشد. همانطور که از تعريف مشهود است, از سوی ديگر همانطور که ديده می شود کميت چيزی از جنس عدد رينولدز می باشد.



پروفيل سرعت در لايه های مختلف يک جريان آشفته و در راستای عمود بر ديواره به صورت زير نشان داده می شود.



در مورد منحنی نشان داده شدة فوق، چند نکته وجود دارد که بايستی به آنها اشاره نمود:

او لا حدودی که برای جريانات زير لاية لزج يا جريان گذرا بر حسب بيان شده است( اعداد ٥ يا ٦٠نشان داده شده بر روی منحنی )، صرفًا برای شرايط خاصی از آزمايش و برای يک صفحة تخت با سطح يکنواخت مي باشند. همين وضعيت قب ً لا برای عدد رينولدز صفحة تخت نيز اشاره شده بود. به عنوان مثال،مرسوم است که برای يک صفحة تخت جريانات دارای عدد رينولدز فراتر از ٥٠٠٠٠٠ جريانات آشفته محسوب می شوند، ليکن اين گفته تنها برای شرايط خاصی از صفحه و شرايط آزمايشگاهی صادق می باشد، به عبارت ديگر عدد ٥٠٠٠٠٠ اشاره شده، برای يک صفحة تخت دارای صافی سطح مشخصی بوده که جريانی با ميزان آشفتگی آزاد مشخصی بر روی آن جريان دارد. چنانچه صافی سطح اين صفحه با استفاده از صيقل کاری افزايش يابد، و يا آنکه جريانی با ميزان آشفتگی آزاد حمل شدة کمتری بر روی صفحه جريان يابد، عدد ٥٠٠٠٠٠ مورد نظر به اعداد بالاتر منتقل می گردد، يعنی لاية مرزی تشکيل شده بر روی صفحة مورد نظر ديرتر و در فواصل طولانيتر نسبت به ابتدای صفحه به حالت آشفته می رسد. بالعکس چنانچه

سطح صفحه زبرتر گردد و يا آنکه ميزان اغتشاشات موجود در جريان آزاد افزايش يابد، ممکن است جريان در اعداد رينولدز خيلی پائين هم به حالت جريان آشفته برسد. همين مطلب برای محدوده های ذکر شده برای نواحی زيرلاية لزج و يا ناحية لگاريتمی و غيره نيز صادق است.

ثانيًا تجربه نشان داده است که ناحية قانون لگاريتمی معمو لا تا ادامه پيدا می کند.

به کميت اصطلاحًا سرعت اصطکاکی گفته می شود. هر چند در عمل هيچ تعبير فيزيکی برای اين کميت نمی توان يافت، ليکن اين کميت که دارای بعد سرعت بوده و کميتی بسيار مناسب برای بی بعدسازی معادلات در فضای جريانات آشفته می باشد.

چنانچه به خاطر داشته باشيد، پيش از اين عدد رينولدز در راستای جريان را به صورت نسبت نيروهای اينرسی به نيروهای لزجت تفسير نموديم. برای راستای عمود بر جريان ( عمود بر صفحه ) نيز می توان عدد رينولدزی به صورت تعريف می نمائيم. با استفاده از اين تعريف, ناحية زيرلاية لزج معادل است. به عبارت ديگر در ناحية زيرلاية لزج، به علت قدرت قابل توجه نيروهای لزجت، اغتشاشات جريانی همگی ميرا می شوند و بالتبع آن جريان در اين ناحيه کام ً لا آرام می باشد. در اين ناحيه است که ترمهای نوسانی سرعت به عنوان مولفه های اغتشاشی، يعنی همگی به سمت صفر ميل می کنند و لذا ترمهای تنشهای رينولدز نظير ( به عنوان عامل آشفته کنندة جريان) به سمت صفرميل می نمايند.

**توابع ديواره و نحوة به دست آوردن آنها:**



 این رابطه ،رابطة اساسی بيان کنندة پروفيل سرعت در نزديک ديواره و تشکيل شده بر روی سطوح صاف می باشد. حال اين رابطه را برای دو ناحية حدی، يعنی ناحية زيرلاية لزج و ناحية تمام آشفته مورد مطالعه قرار می دهيم:

**الف) زير لاية لزج که در آن می باشد:**

همانطور که پيش از اين اشاره شد, برای ناحية نزديک ديواره, جريان کام ً لا آرام بوده و لذا نقش آشفتگی جريان تقريبًا از بين رفته است. لذا در اين ناحيه لزجت سينماتيکی آشفتگی در مقايسه با لزجت سينماتيکی جريان آرام قابل صرفنظر کردن است. به عبارت ديگر





**ب) ناحية تمام آشفته که در آن می باشد:**

در اين ناحيه, از آنجا که آشفتگی, فيزيک غالب جريان محسوب می شود, لذا



به اين ناحيه اصطلاحًا ناحية دارای قانون لگاريتمی گفته می شود. اندازه گيری های تجربی نشان داده اند که قانون

**مدل های آشفتگی:**

به طور کلی اين مدلها را می توان به سه دسته تقسيم نمود:

١‐ مدلهای صفر معادله ای

٢‐ مدلهای يک معادله ای

٣‐ مدلهای دو معادله ای

مدلهای صفر معادله ای، تنها از روابط و معادلات جبری جهت توصيف رابطة بين و خواص محاسبه شده و يا قابل اندازه گيری استفاده می کنند. مدلهای يک معادله ای از يک معادلة انتقال PDE اضافی نيز در اين بين استفاده می کنند، مدلهای دو معادله ای شامل دو عدد PDE اضافی هستند.

**مدلهای صفر معادله ای ( مدلهای طول اختلاطی ) :**

نظرية طول اختلاطی، فقط برای جريانات نسبتا ساده نظير جريانات برشی نازک و جريانات جت و جريانات wakes و جريانات لاية مرزی تشکيل شده بر روی ديواره خوب کار ميکند. چراکه تنها برای اين جريانات است که می توان را با روابط تجربی ساده بيان نمود. اما اين مدل اثرات انتقالی آشفته و نيز History effect نظير جريانات آشفته را در نظر نميگيرد (بعنوان توضيح بيشتر، اين مدل نمی تواند اثرات اغتشاشات ايجاد شده در بالادست جريان را بر روی جريان پائين دست پيش بينی نمايد.) از نقطه نظر رياضی، سيستم معادلات جريان به دست آمده از مدلسازی جريان آشفتة از نوع صفر معادله ای تقريبًا همانند سيستم معادلات مربوط به جريانات آرام می باشد که در آن μثابت و يا متغير نسبت به مکان و رژيم موضعی جريان است. به عنوان مثالی ديگر از جريانات دارای ويسکوزيتة متغير می توان به جريانات دارای ويسکوزيتة وابسته به دما و يا جريان سيالات غير نيوتنی باويسکوزيتة وابسته به برش اشاره نمود.

بنابراين از نقطه نظر محاسباتی و خواص همگرائی، می توان انتظار داشت که در استفاده از مدل طول اختلاطی ( يا مدلهای صفر معادله ای ) در نهايت رفتاری شبيه به رفتار جريانات آرام را شاهد خواهيم بود.بالاخص چنانچه از شرايط مرزی مناسب استفاده شده باشد، حل عددی با استفاده از اين مدلها، با سرعت بالاتری همگرا شده و نتايج همگرا شدة بهتری را در تعداد تکرار کمتر خواهد داد. به علاوه در استفاده از روش صفر معادله ای, خواص همگرائی فرآيند حل به پارامترهای ذيل حساس نميباشد:

١‐ تغييرات جزئی در چگالی و توزيع مکانی المانها

٢‐ تغييرات در شکل دامنة محاسباتی

٣‐ حدس اولية آغازين

لازم به ذکر است که اين مدل در جاهائي که فرآيند جابجائی و يا ديفيوژن کميتهای آشفتگی مهم است نظير:

١‐ جرياناتی که دارای نرخ تشکيل بالائی می باشند ( نظير جريانات انفجاری, تخلية ظروف و يا معابرپر فشار)

٢‐ انتقال حرارت در عرض صفحات بدون گراديان جريانی

مناسب نخواهد بود.

**مدل استاندارد** *k* –ε:

مدل *k* –ε معروفترين مدل دو معادله ای می باشد. چرا که فهم آن آسان و استفاده از آن در برنامه نويسی ساده می باشد. در این مدل ميدان آشفته بر حسب دو متغير بيان می شود:

الف) انرژی جنبشی جريان آشفتة K

ب) نرخ اضمحلال ويسکوز انرژی جنبشی آشفتة ε



می توان بکمک آناليز ابعادی نشان داد که ويسکوزيتة آشفتة را می توان به طول مقياس ادی های بزرگ جريان آشفته مرتبط ساخت:



که در آن به ترتيب سرعت مقياس و طول مقياس بزرگترين ادی ها در ميدان جريان آشفته ميباشند. بعلاوه می توان نشان داد که:





که در آن يک ضريب تجربی است که مقدار آنرا معمولا برابر 0.09 در نظر می گيرند.



که در آن ضرائبی تجربی بوده و نيز به ترتيب اعداد پرانتل و اشميت آشفته ميباشند.

ترمهای و بترتيب بيانگر فرآيندهای توليد برشی و فرآيندهای اضمحلال ويسکوز می باشند. ترم بيانگر اثرات بويانسی می باشد ترم G بيانگر ميزان توليد انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از اندرکنش بين جريان متوسط و ميدان جريان آشفته می باشد و از همينرو به آن اصطلاحا ترم توليد برشی گفته می شود. ترم B نيز بيانگر ترم توليد‐اتلاف بويانسی ناشی از ميدان چگالی نوسان کنندة جريان می باشد.







برای جريانات چگالی ثابت، ترمهای بويانسی بصورت زير بدست می آيند:



معادلة نظير εدر مدل استاندارد( توسعه یافته):



**شرايط مرزی ورودی برای مدلهای دو معادله ای:**

دو حالتی که اغلب در جريانات با آنها مواجه می گرديم، عبارتند از:

الف) جريانات خارجی / جريانات غير محصور

ب) جريانات داخلی يا نسبتًا محصور

**شرايط مرزی خروجی و تقارن برای مدلهای دو معادله ای:**

