

«به نام خدا»



گروه دینامیک سیالات محاسباتی

دانشگاه صنعتی اصفهان

حل عددی جریان توسعه یافته در لوله صاف هیدرولیکی به کمک نرم افزار fluent

علی مومنی

کلیه حقوق این کتاب الکترونیک متعلق به گروه دینامیک سیالات محاسباتی دانشگاه صنعتی اصفهان می باشد

هر گونه چاپ، تکثیر و استفاده از آن با ذکر منبع بلا مانع است.

<http://CFD.iut.ac.ir>



چکیده

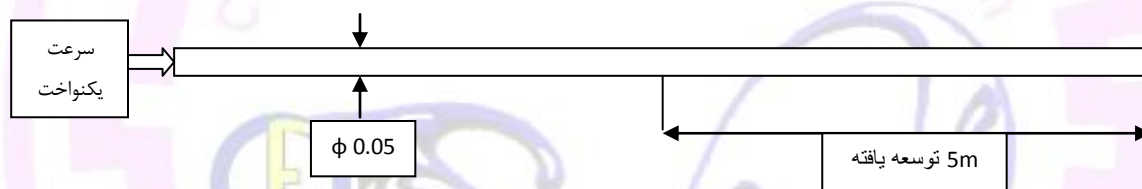
در این پروژه حل عددی سه حالت جریان در لوله صاف هیدرولیکی در شرایط توسعه یافته انجام شد و با بررسی شبکه عددی مسأله به این نتیجه رسیدیم که شبکه عددی مناسب، شبکه غیر یکنواختی با شکل سلول مستطیلی است که با آنالیز همگرایی شبکه تا درجه مشخصی ریز شده است. همچنین پس از توضیحات لازم مربوط به تنظیم نرم افزار، شرایط مرزی مسأله بررسی شد و مشخص گردید که تغییرات اغتشاشات ورودی اثر چندانی بر جواب ها در ناحیه توسعه یافته نمی گذارد. در ادامه با حل جریان مغشوش با مدل های مختلف توربولانسی نتیجه شد که مدل هایی که از تابع دیوار اصلاح شده^۱ به همراه اصلاحات اثر رینولدز پایین^۲ استفاده می کنند دقیق ترین جواب را می دهند و در مورد این مسأله مدل یک معادله ای `spalart-almaras` بهترین ترین مدل از نظر دقت و هزینه محاسبات است. پس از حل سه حالت جریان با دو روش آرام و مغشوش به این نتیجه رسیدیم که مدل های مغشوش برای جریان آرام جواب قابل قبولی میدهند درحالی که روش آرام قادر به حل جریان مغشوش نیست ولی حالت گذرا را بهتر از حالت مغشوش حل می کند. نتیجه کلی اینکه در مسائلی که هر سه حالت جریان در آن رخ می دهد، استفاده از مدل های توربولانسی تخمین مناسبی از جریان می دهد در حالی که روش آرام قادر به انجام این کار نیست.

¹ - Near-Wall Treatments

² - Low-Re Modifications

1- مقدمه

در این گزارش نتایج حاصل از حل عددی جریان درون یک لوله صاف افقی، به کمک نرم افزار Fluent 6.3.26، ارائه و بررسی می گردد. جریان درون لوله در سه حالت آرام، گذار و مغشوش و در حالت کاملاً توسعه یافته بررسی میشود. ابتدا ملاحظات شبکه عددی مورد نیاز این مسأله را بررسی می کنیم و پس از انتخاب شبکه عددی مناسب به توضیح نحوه تنظیم نرم افزار برای حل جریان مغشوش میپردازیم. در ادامه جریان مغشوش با استفاده از مدل های مختلف توربولانس را حل کرده و مدل ها را با هم مقایسه می کنیم. پس از آن هریک از حالات جریان را با فرض جریانی آرام و مغشوش حل می کنیم و نتایج را بررسی میکنیم. بمنظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی طول لوله ای که در نرم افزار حل می گردد آنقدر بلند در نظر گرفته میشود تا حداقل 5m از لوله در ناحیه توسعه یافته قرار گیرد. قطر لوله را 5cm انتخاب می کنیم.



سیال جاری در لوله را آب با مشخصات زیر در نظر می گیریم:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = 998.2 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \\ \nu = 1.004 \left(\frac{m^2}{s} \right) \end{array} \right.$$

1-1- جریان آرام

در این حالت رینولدز جریان را 498 در نظر می گیریم بنابراین با توجه به قطر لوله داریم:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = 498 \quad \rightarrow \quad v = 0.01$$

با توجه به رابطه 7-23 مرجع [1] برای طول ناحیه توسعه یافته خواهیم داشت:

$$x = \frac{R_e}{20} D \rightarrow x \approx 1.25 \text{ m}$$

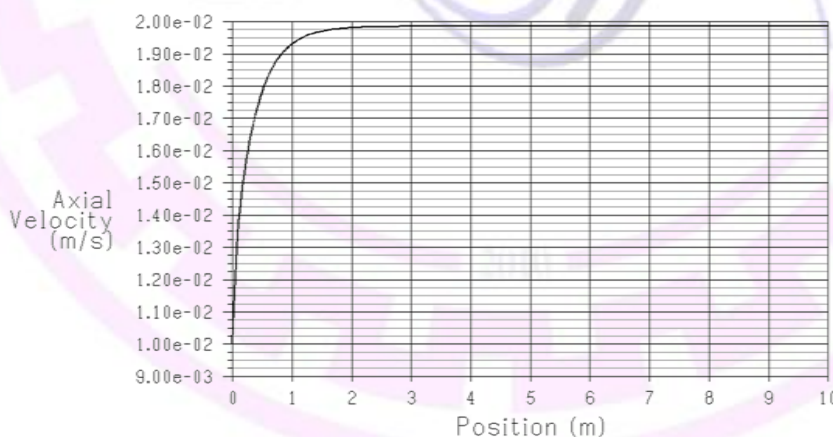
و طبق رابطه 7-15 مرجع [1] برای ضریب اصطکاک خواهیم داشت:

$$C_f = \frac{16}{R_e} \rightarrow C_f = 0.003212$$

طبق رابطه 8-20 مرجع [2] داریم:

$$\Delta p = 4\rho C_f \frac{1}{D} \frac{v^2}{2} \rightarrow \Delta p = 0.641 \text{ (pa)}$$

در حل عددی طول توسعه یافتگی را از نمودار سرعت محوری در مرکز لوله بدست می آوریم یعنی از طولی که سرعت محوری ثابت می ماند را ناحیه توسعه یافته در نظر می گیریم. بطور مثال در شکل 3-1 جریان تقریباً در طول 3m به توسعه یافتگی میرسد. بنابراین با اطمینان می توان گفت جریان در فاصله 5 تا 10 متری لوله کاملاً توسعه یافته است و اعدادی که در این ناحیه خوانده می شوند خواسته مسأله هستند.



شکل 3-1: سرعت محوری در طول لوله

1-2- ناحیه گذار

بدلیل اینکه روابط مشخصی برای ناحیه گذار در دست نیست بنابراین اعداد حاصل از نتایج آزمایشگاهی که در مرجع [3] ارائه شده است را به عنوان معیار در نظر می گیریم. طبق اعداد گزارش شده رینولدز این ناحیه 2195 در نظر گرفته می شود که امکان مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود داشته باشد. باید به این نکته توجه کرد که بدلیل برابر نبودن قطر لوله با قطر لوله آزمایش شده به ناچار باید از اعداد بی بعد ضریب اصطکاک و ضریب فشار بعنوان معیار مقایسه استفاده کرد که برای نتایج تجربی این اعداد برابر هستند با:

$$v = 0.727 \left(\frac{m}{s} \right), \quad \Delta p = 782.665(pa), \quad f = 0.0292, \quad R_e = 2190.55$$

$$C_f = \frac{f}{4} = 0.00730, \quad C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v^2} = 2.97$$

1-3- ناحیه مغشوش

در این ناحیه رینولدز بزرگتر از مقدار بحرانی 2300 است که ما در این مسأله رینولدز 8000 را در نظر می گیریم. بنابراین با توجه به قطر لوله داریم:

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} = 8000 \rightarrow v = 0.044$$

طبق رابطه بلازیوس [2] برای ضریب اصطکاک در جریان مغشوش لوله صاف داریم:

$$C_f = \frac{0.0791}{R_e^{\frac{1}{4}}} = 0.008364$$

و طبق فرمول دارسی که در قبل ذکر شد افت فشار در 5 متر از لوله میشود:

$$\Delta p = 4 \rho C_f \frac{l}{D} \frac{v^2}{2} \rightarrow \Delta p = 43.09(pa)$$

باید توجه کرد که جریان مغشوش سریعتر از جریان آرام به توسعه یافتگی می رسد بطوریکه طول توسعه یافتگی برای این مسأله طبق رابطه 13-2 مرجع [1]:

$$x = 0.623 Re^{0.25} D = 0.295 (m)$$

که کمتر از حالت آرام است.

2- ملاحظات شبکه عددی

در محاسبات عددی یکی از عوامل مهمی که زمان حل، هزینه محاسبات و میزان دقت نتایج بشدت به آن وابسته است نحوه مش بندی ناحیه می باشد. برخی از عواملی که بعنوان پارامترهای کیفیت شبکه بیان شده اند عبارتند از:

1- نحوه توزیع و تراکم نقاط در فضای حل³:

در برخی از نواحی دامنه حل که در آن گرادیان بعضی از متغیرهای میدانی جریان زیاد است مانند لایه مرزی، جریان برشی، جدایی جریان و... برای رسیدن به جواب مناسب لازم است مش را ریز کنیم. از طرفی یکی از دلایل بوجود آمدن خطا، پخش کاذب⁴ است که در واقع جزئی از ترم های خطای برشی بوده و باعث افزایش ضریب انتشار واقعی جریان می شود و یکی از راه های مؤثر کاهش این خطا، ریز کردن شبکه است.

2- هموار بودن مش⁵:

تغییرات ناگهانی تراکم نقاط در فضای حل باعث تغییرات شدید حجم سلول ها می شود و این امر خطای برشی که در واقع اختلاف بین معادله دیفرانسیل اصلی و معادله گسسته سازی شده است را افزایش می دهد.

3- شکل سلول و ضریب شکل⁶:

³ - node density

⁴ - false diffusion

⁵ - smoothness

⁶ - skewness



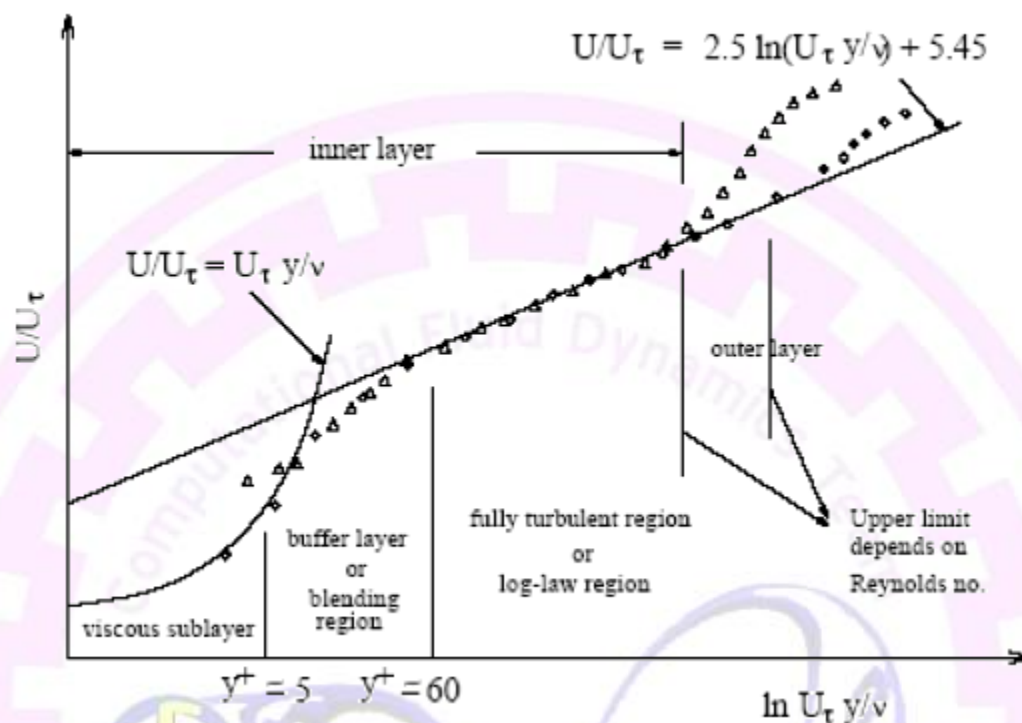
از جمله راه هایی که پخش کاذب را کاهش می دهد همسو شدن مش و جریان است بنابراین چنانچه شکل سلول در جریان های ساده به شکل مستطیل نزدیک باشد در میزان کاهش خطا مؤثر خواهد بود.

حال بمنظور یافتن مش مناسب برای مسئله مورد نظر به بررسی حالت های مختلف می پردازیم.

2-1- غیر یکنواخت بودن مش:

بدلیل وجود لایه مرزی در نزدیک دیواره و زیاد بودن گرادیان متغیر های میدانی جریان ، برای مشهود شدن این تغییرات باید شبکه در نزدیک دیوار ریزتر گردد. در حالت مغشوش همانطور که در شکل 4-1-1 مشخص شده جریان به دو ناحیه داخلی و خارجی تقسیم می شود که ناحیه داخلی دارای سه قسمت زیر لایه لزج ، لایه میانی و ناحیه کاملاً مغشوش است. در ناحیه نزدیک به دیوار اثرات لزجت مولکولی ، نوسانات مؤلفه های مماسی سرعت را کاهش می دهد و این در نهایت باعث کاهش نوسانات مؤلفه عمودی هم می شود. در روش های عددی برای آشکار کردن اثرات دیوار یا از مدل کردن جریان در نزدیک دیوار استفاده می کنند و یا اینکه در نزدیک دیوار شبکه را بگونه ای ریز می کنند که حداقل یک نقطه شبکه در داخل زیر لایه لزج قرار گیرد . برای اطمینان از این حالت از پارامتر بی بعد y^+ که به صورت زیر تعریف می شود استفاده می کنند.

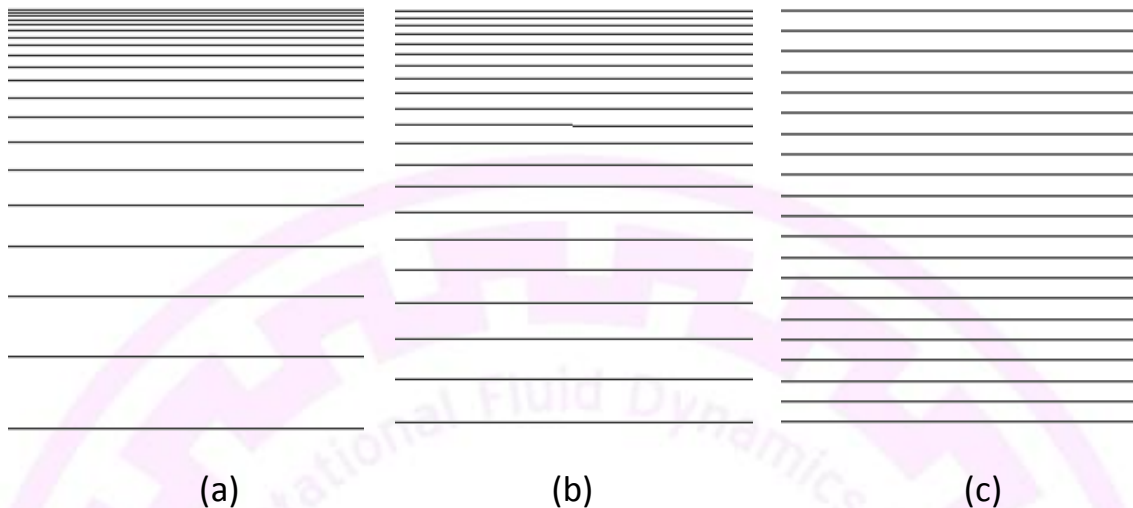
$$y^+ = \frac{U_\tau \cdot y}{\nu}$$
$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$



شکل 2-1: تقسیم بندی ناحیه نزدیک دیوار در جریان مغشوش

بنابراین شبکه بندی باید بگونه ای صورت گیرد که اگر در رابطه بالا بجای y فاصله اولین نقطه شبکه از دیوار را قرار دهیم، مطابق شکل 2-1، مقدار عددی کوچکتر از 5 گردد. (در مورد نحوه وارد کردن اثرات دیواره در مدل های اغتشاشی در بخش 3- توضیح داده شده).

در شکل 2-2 هر دو نوع مش یکنواخت و غیر یکنواخت برای 40 سلول در عرض لوله با شرایطی که در بالا به آن اشاره شد برای مسئله مورد نظر نشان داده شده است. این دو نوع شبکه برای حل جریان آرام و مغشوش مسئله استفاده شد که نتایج آن با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک بعنوان معیار مقایسه در جدول 2-1 ارائه شده است. (در این شبکه ها از شبکه مستطیلی استفاده شده که علت آن در بخش بعد توضیح داده شده).



شکل 2-2: (a) $y^+ = 0.721$ (b) $y^+ = 2.37$ (c) شبکه یکنواخت

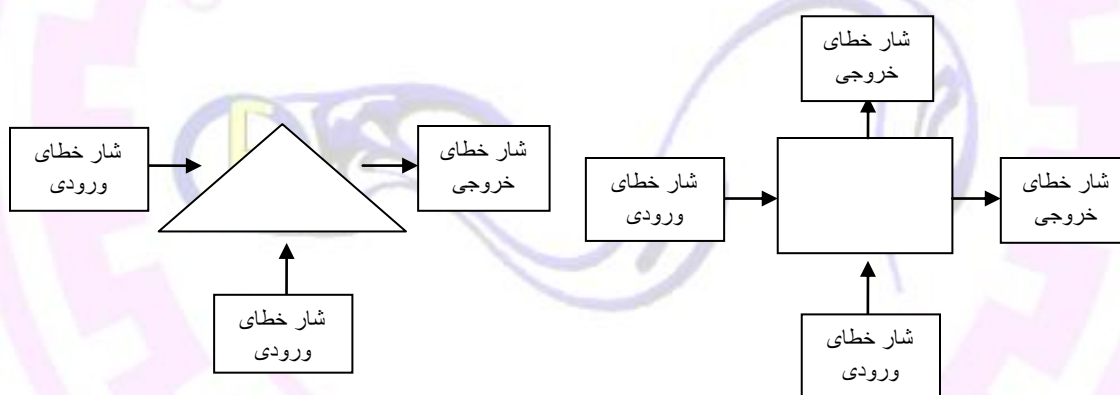
جدول 1-2: ضریب اصطکاک جریان آرام و درهم برای شبکه های یکنواخت و غیر یکنواخت

ضریب اصطکاک	(a)	(b)	(c)	جواب تجربی
جریان آرام	3.195e-2	3.21e-2	3.11e-2	3.21e-2
درصد خطا	0.46	0	3.21	----
جریان درهم	9.08e-3	9.21e-3	9.79e-3	8.36e-3
درصد خطا	8.61	10.17	17.11	----

با مقایسه نتایج جدول 1-4 مشاهده می گردد که تأثیر غیر یکنواخت کردن شبکه در جریان مغشوش در بهبود نتایج بیشتر از جریان آرام است.

2-2- بررسی تأثیر شکل سلول

بطور کلی در حالت جریان دو بعدی شبکه بندی دامنۀ حل را میتوان با دو المان مستطیلی و مثلثی انجام داد ولی شبکه بندی مثلثی برای جریان در لایه مرزی چندان مناسب نخواهد بود. زیرا همانطور که قبلاً گفته شد ، باید شبکه عددی در نزدیکی دیوار ریز گردد و با توجه به ثابت بودن طول قائدهٔ مثلث در سلول روی دیوار ، با کاهش ارتفاع مثلث ، شکل آن از متساوی الاضلاع خارج شده و سلول، تخت می گردد، بنابراین ضریب شکل کاهش یافته و خطای سلول افزایش میابد . همانطور که قبلاً گفته شد برای کاهش پخش کاذب باید اضلاع سلول در راستای خطوط جریان باشد که در سلول مثلثی اینگونه نیست و از طرفی در سلول مثلثی شار خطا از دو ضلع وارد و از یک ضلع خارج می شود که باعث تجمع خطا در سلول می گردد. این موارد در شکل 2-3 نشان داده شده.



شکل 2-3: تجمع خطا در سلول مثلثی

2-3- تراکم شبکه عددی

بدلیل اینکه ریز کردن شبکه عددی باعث نزدیک شدن جواب به جواب تجربی می گردد لازم است آنقدر شبکهٔ عددی ریز گردد تا تغییرات بوجود آمده در جواب در اثر ریز کردن شبکه ناچیز شود. با این روش میتوان به شبکه عددی مناسب برای حل مسئله رسید که در آن عمدهٔ خطای موجود در جواب ناشی از روش عددی بکار رفته باشد و اندازه شبکه در جواب تأثیری نگذارد. بنابراین دامنۀ حل مسئله در جریان آرام را با ضریب

غیریکنواختی 1.1 که در 5 مرحله ریز میشود شبکه بندی شد و نتایج حاصل از حل این شبکه ها در جدول 2-2 و نمودار های 1-2 ارائه شده است.

جدول 2-2: ضریب اصطکاک و افت فشار برای جریان آرام برای شبکه با سایزهای متفاوت

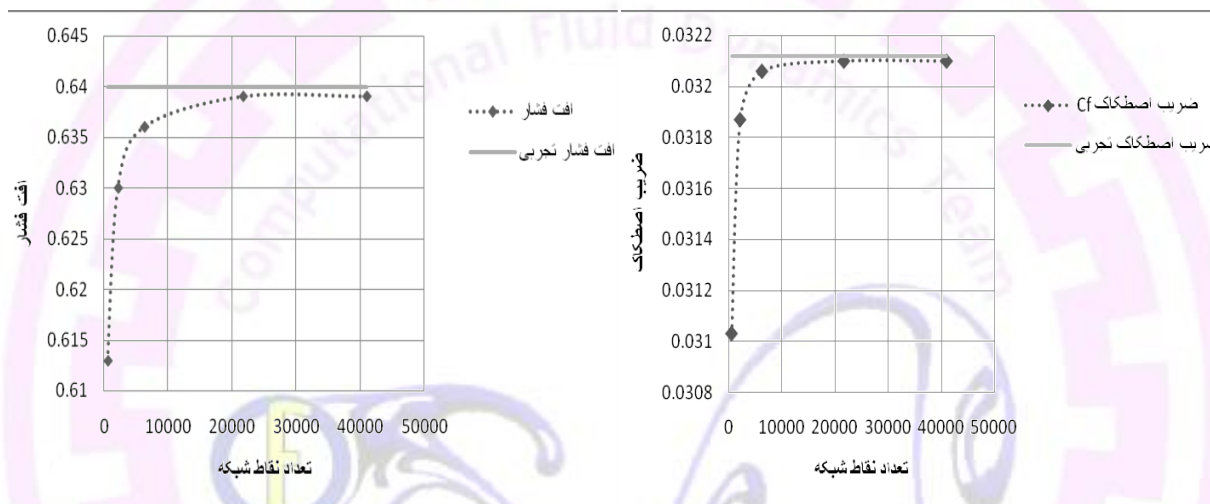
جریان آرام	تعداد نقاط شبکه	در طول لوله	101	201	301	701	1001
		در عرض لوله	6	11	21	31	41
تعداد نقاط			606	2211	6321	21731	41041
ضریب اصطکاک Cf			0.03103	0.03187	0.03206	0.0321	0.0321
ضریب اصطکاک تجربی			0.03212	0.03212	0.03212	0.03212	0.03212
درصد خطا			3.39	0.78	0.19	0.06	0.06
افت فشار در طول 5 متر (pa)			0.613	0.63	0.636	0.639	0.639
افت فشار تجربی			0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
درصد خطا			4.22	1.56	0.63	0.16	0.16

همانطور که ملاحظه می شود هنگامیکه تعداد نقاط شبکه از 21731 افزایش می یابد دیگر تغییری در جواب در اثر ریز کردن شبکه حاصل نمی شود و در صد خطا ثابت باقی می ماند. این امر بوضوح در نمودار 1-2 قابل مشاهده است. بنابراین برای حل مسئله جریان آرام افزایش بیش از 21731 نقاط شبکه فقط هزینه و زمان محاسبات را افزایش می دهد.

در مورد جریان مغشوش ، ناحیه حل را با ضریب غیر یکنواختی 1.2 در 4 مرحله ریز میکنیم . قابل ذکر است که بمنظور بررسی اثر سایز شبکه در جریان مغشوش فقط مدل $k-\epsilon$ مورد بررسی قرار گرفته است که نحوه

تنظیم این مدل در فلوئنت در بخش 3-1 توضیح داده میشود. نتایج بدست آمده از این بررسی در جدول 2-3 و نمودار 2-2 ارائه شده است.

با بررسی نتایج ملاحظه می شود که هنگامی که تعداد نقاط شبکه از 21731 بیشتر میشود ریز کردن شبکه تأثیری بر جواب بدست آمده ندارد تنها باعث افزایش زمان و هزینه محاسبات میشود و اختلاف بین جواب عددی و نتیجه تجربی که در نمودار 2-2 ملاحظه می شود را میتوان خطای مدل در نظر گرفت.

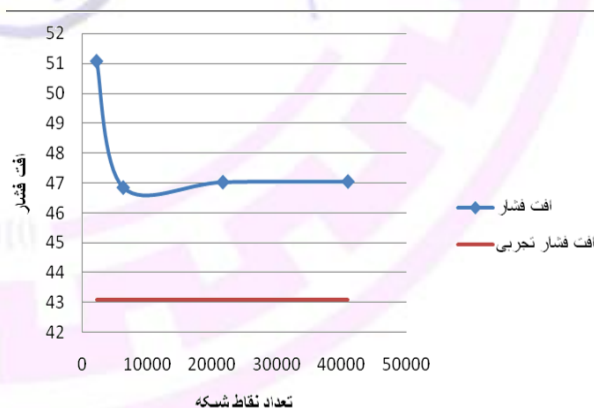
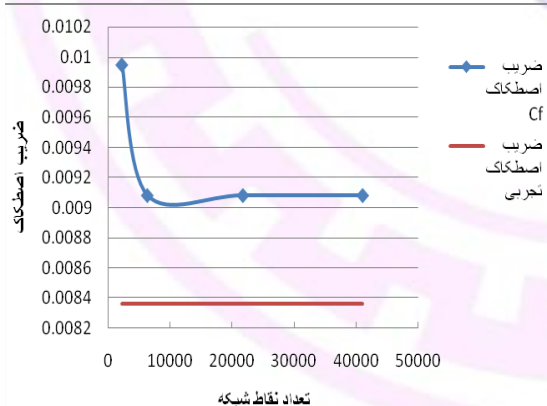


نمودار 2-1: تغییرات ضریب اصطکاک و افت فشار با سایز شبکه در جریان آرام

بنابراین با مطالعه شبکه در این فصل میتوان نتیجه گرفت که شبکه مناسب برای مسئله مورد نظر، شبکه مستطیلی غیریکنواخت با ضریب 1.1 برای جریان آرام و ضریب 1.2 برای جریان مغشوش با تعداد 21731 نقطه است که 31 نقطه در شعاع لوله و 1001 نقطه در طول 10 متری لوله در نظر گرفته میشود.

جدول 2-3: ضریب اصطکاک و افت فشار برای جریان آرام برای شبکه با سایزهای متفاوت

جریان مغشوش	تعداد نقاط شبکه	در طول لوله	201	301	701	1001
		در عرض لوله	11	21	31	41
تعداد نقاط شبکه			2211	6321	21731	41041
Y+			5.43	0.72	0.11	0.02
ضریب اصطکاک Cf			0.00995	0.00908	0.00908	0.00908
ضریب اصطکاک تجربی			0.00836	0.00836	0.00836	0.00836
درصد خطا			19.02	8.61	8.61	8.61
افت فشار			51.07	46.86	47.04	47.06
افت فشار تجربی			43.09	43.09	43.09	43.09
درصد خطا			18.52	8.75	9.17	9.21



نمودار 2-2: تغییرات ضریب اصطکاک و افت فشار با سایز شبکه در جریان مغشوش

3-تنظیمات فلوئنت و تعیین اثرات شرایط مرزی و مدل دیواره

در این بخش نحوه تنظیم نرم افزار فلوئنت برای حل جریان مغشوش را توضیح داده و پارامترهای توربولانسی را برای مدل مورد نظر بررسی کرده و شرایط مرزی مناسب برای مسأله را با ارائه دلایل و نتایج انتخاب میکنیم.

3-1- تنظیمات اولیه برای انتخاب مدل :

ابتدا باید نسخه 2d double-precision را از منوی شروع فلوئنت اجرا کنیم ، این نسخه امکان استفاده از دقت مضاعف در فلوئنت را بماندهد و بدلیل اینکه هندسه مسأله دارای مقیاس های طولی متفاوتی است یعنی نسبت طول به قطر لوله بزرگ است استفاده از این نسخه الزامیست.

پس از اجرای نرم افزار از مسیر

Main Menu > File > Read > Case...

فایل شبکه مسأله که قبلاً در نرم افزار gambit ایجاد شده را فراخوانی می کنیم. سپس از مسیر

Main Menu > Grid > Check

شبکه تولید شده را چک می کنیم. حال برای تعیین نوع حل کننده به مسیر

Main Menu > Define > Models > Solver

می رویم. در این حالت دو گزینه برای انتخاب solver وجود دارد که عبارتند از: segregated که معادلات پیوستگی و ممنتوم و انرژی را بصورت متوالی حل می کنند و برای حل جریان های تراکم ناپذیر و تراکم پذیر آرام مناسب است و coupled که معادلات را بصورت همزمان حل می کند برای جریان های تراکم پذیر با سرعت بالا استفاده می شود بیاورین ما گزینه segregated را فعال می کنیم. همچنین در پنجره باز شده از منوی space گزینه Axisymmetric را انتخاب می کنیم، زیرا لوله را بصورت دو بعدی متقارن در نظر گرفته ایم. پس از آن باید از مسیر

Main Menu > Define > Models > Viscous

مدل مورد نظر برای حل جریان توربولانس را انتخاب می کنیم. با انتخاب هر مدل پارامترهای مربوط به مدل فعال میشود ، ضرایب استاندارد هر مدل بصورت پیش فرض در نظر گرفته شده است و همچنین میتوان نحوه رفتار مدل در نزدیکی دیوار را تعیین کرد که این گزینه ها در بخش 5-2 توضیح داده شده. پس از انتخاب مدل باید نوع سیالی که در لوله جریان میابد را از مسیر

Main Menu > Define > Materials...

تعیین کنیم . در این پنجره مقدار چگالی و ویسکوزیته سیال را که ما آب در نظر گرفته ایم وارد میکنیم ، سپس از مسیر

Main Menu > Define > Boundary Conditions...

شرایط مرزی مسأله را تعیین می کنیم که در بخش 5-3 بطور کامل توضیح داده شده. حال باید از منوی solve شرایط حل مسأله را تعیین کنیم برای این منظور ابتدا به مسیر

Main Menu > Solve > Controls > Solution...

در این پنجره تعیین می کنیم که معادلات پیوستگی و ممنتوم و معادلات مدل توربولانس از چه مرتبه ای گسسته سازی شوند. باید توجه کرد که فلوننت ترم های دیفیوژن را همواره به صورت مرتبه دوم گسسته سازی می کند و ما فقط میتوانیم مرتبه گسسته سازی ترمهای جابجایی را تعیین کنیم . برای مسأله مورد نظر از گسسته سازی مرتبه دوم برای تمامی معادلات استفاده می کنیم که در صورت یکسان بودن مقدار اولیه، سرعت همگرایی آن بیشتر خواهد بود و جواب دقیق تری میدهد اما چنانچه مقادیر اولیه ای که به دو روش گسسته سازی می دهیم یکسان نباشد، نمیتوانیم نتیجه بگیریم که گسسته سازی مرتبه دوم جواب دقیق تری دارد. در پنجره باز شده ضرایب تخفیف بصورت پیش فرض برای جریان تراکم ناپذیر داده شده اند و ما این ضرایب را برای حل مسأله مورد نظر تغییر نمیدهیم ولی در مسائل تراکم پذیر چنانچه جواب همگرا نشود لازم است این ضرایب کاهش داده شوند. حال باید برای آغاز حل به شبکه مقدار اولیه بدهیم برای این منظور به مسیر

Main Menu > Solve > Initialize > Initialize...

رفته و در پنجره باز شده تعیین می کنیم که محاسبات از قسمت ورودی جریان آغاز شود، با این کار فلوئنت مقادیر اولیه سلول های ورودی جریان را همان شرایط مرزی داده شده قرار میدهد. در مورد مقادیر اولیه پارامترهای توربولانس در بخش 3-5 توضیح داده میشود. پس از مقدار اولیه دادن به مسأله باید یک معیار همگرایی برای مسأله تعریف کنیم برای این منظور به مسیر

Main Menu > Solve > Monitors > Residual...

رفته و مقدار باقیمانده ها را به مقدار $1e-6$ تغییر میدهیم، با این کار فلوئنت پس از هر بار تکرار و بدست آوردن میدان حل ، مقادیر را در معادله گسسته سازی شده قرار داده و باقیمانده را حساب می کند و چنانچه باقیمانده از مقدار $1e-6$ کمتر شود جواب همگرا شده و تکرار متوقف می گردد. پس از این مرحله مسأله آماده حل شده و کافی است از مسیر

Main Menu > Solve > Iterate...

تعداد تکرار را وارد کنیم. نرم افزار شروع به حل کرده و مقدار باقیمانده را پس از هر تکرار نمایش می دهد. منفی بودن شیب نمودار نشان می دهد حل در جهت همگرا شدن پیش می رود. چنانچه تعداد تکرار برای همگرا شدن کافی نبود باید تعداد تکرار را افزایش دهیم. پس از همگرا شدن جواب می توانیم تغییرات کمیات مختلف از جمله سرعت در محور لوله و ضریب اصطکاک و یا فشار را از مسیر

Main Menu > Plot > XY Plot...

بدست آوریم و یا تغییرات کمیات برداری جریان را از مسیر

Main Menu > Display > Vectors...

نمایش دهیم. باید توجه شود که برای رسم کمیت هایی مانند ضریب اصطکاک که به محاسبات نیاز دارد باید ابتدا از مسیر

Main Menu > Report > Reference Values...

مقادیر مرجع را با انتخاب قسمت ورودی به فلوئنت معرفی کنیم.

2-3) بررسی و انتخاب مدل در نزدیک دیوار

جریان مغشوش شدت تحت تأثیر وجود دیواره است و علاوه بر این میدان های سرعت میانگین باید به گونه ای شکل بگیرند تا شرط عدم لغزش روی دیواره ارضا شود. از طرفی اغتشاشات در اثر وجود دیواره بشکل قابل توجهی کاهش خواهد یافت. بنابراین در مدل مغشوشی که استفاده می کنیم باید اثر دیواره را در نظر بگیریم. در فلوئنت سه روش عمده برای این منظور وجود دارد:

3-2-1- تابع دیوار استاندارد^۷

در این روش زیر لایه لزج و ناحیه میانی مورد تجزیه و تحلیل قرار نمی گیرند و به جای آن از فرمول نیمه تجربی به نام تابع دیواره استفاده می شود که توسط اسپالدینگ و لاندرا ارائه شده است:

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) \quad U^* \equiv \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu}$$

این روابط برای $30 < y^* < 300$ معتبر است البته فلوئنت از روابط برای $y^* > 11.225$ استفاده می کند و برای المانهایی که $y^* < 11.225$ دارند فلوئنت از قانون تعادل $U^* = y^*$ استفاده می کند. بنابراین این روش نیازی به شبکه عددی بسیار ریز در نزدیکی دیوار ندارد.

3-2-2- توابع دیوار غیر تعادلی^۸ (مدل دو لایه ای)

بدلیل اینکه تابع دیوار استاندارد به اثرات گرادیان فشار حساس نیست و علاوه بر این مفهوم مدل دو لایه ای برای محاسبه نرخ انرژی توربولانس مناسب تر است میتوان برای رسیدن به جواب دقیق تر از مدل دو لایه ای استفاده کرد که تابع لوگاریتمی آن بصورت زیر است:

⁷ -standard wall function

⁸ - Non-Equilibrium Wall Functions



$$\frac{\tilde{U} C_{\mu}^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \right)$$

که در آن:

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} \left[\frac{y_v}{\rho \kappa \sqrt{k}} \ln \left(\frac{y}{y_v} \right) + \frac{y - y_v}{\rho \kappa \sqrt{k}} + \frac{y_v^2}{\mu} \right]$$

و y_v در آن ضخامت زیر لایه لزج فیزیکی است و $y_v^* = 11.225$ است.

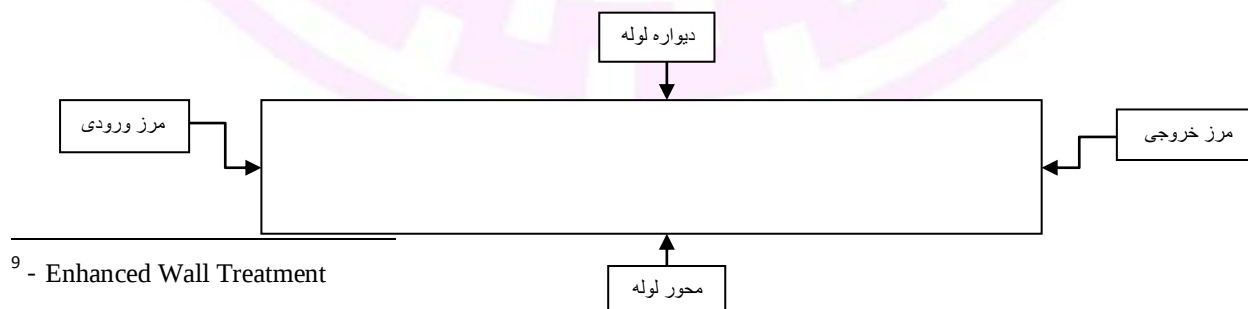
3-2-3- توابع دیوار اصلاح شده⁹:

این گزینه یک روش مدلسازی در نزدیک دیوار است که مدل دو لایه ای را با توابع دیوار اصلاح شده ترکیب می کند. در این مدل لازم است که شبکه با اندازه کافی در نزدیکی دیوار ریز شده باشد بطوری که $y^+ \approx 1$ گردد. بنابراین حل جریان توربولانس با این روش هزینه محاسباتی را افزایش می دهد.

بطور کلی روش های تابع دیوار و مدل دو لایه ای برای جریان های با رینولدز کم و در مواقعی که جدایی جریان یا نیروهای حجمی قوی داریم مناسب نیستند. بنابراین در حل این مسأله از مدل تابع دیوار اصلاح شده استفاده می کنیم زیرا بدلیل ساده بودن مسأله ریز کردن شبکه عددی هزینه محاسباتی را چندان افزایش نمیدهد.

3-3- شرایط مرزی و پارامترهای توربولانس

همانطور که از هندسه مسأله مشخص است سه مرز در مسأله وجود دارد که در شکل 5-1 نشان داده شده است.



⁹ - Enhanced Wall Treatment

3-3-1- مرز ورودی:

بدلیل معلوم بودن رینولدز جریان می توان شرط مرزی سرعت یکنواخت را در ورودی در نظر گرفت پارامترهایی که در شرط مرزی سرعت به فلوئنت باید داده شود عبارتند از :

1 - سرعت جریان: سرعت جریان باید عمود بر مرز باشد و برای جریان یکنواخت مقدار آن ثابت در نظر گرفته میشود.

2 - پارامتر های توربولانسی در مرز ورودی:

بدلیل اینکه مقادیر انرژی جنبشی توربولانس (k) و اتلاف انرژی جنبشی (ϵ) در مرز ورودی را به صورت صریح نداریم باید در مورد جریان در لوله از گزینه قطر هیدرولیکی و شدت توربولانس I^{10} استفاده کنیم که بصورت زیر تعریف می شود:

$$I = \frac{\bar{u}}{u_{avg}}$$

که در جریان در داخل لوله این مقدار میتواند از 1٪ تا 10٪ تغییر کند. فلوئنت با استفاده از این پارامترها ، ویسکوزیته و انرژی جنبشی توربولانس و ترم اتلاف را در مدل های مختلف از روابط زیر محاسبه می کند و هنگامی که مقدار اولیه در مرز ورودی را در مسیر:

Main Menu > Solve > Initialize > Initialize...

انتخاب می کنیم مقادیر k و ϵ را محاسبه کرده و بعنوان مقدار اولیه در نظر می گیرد که می توان در پنجره مربوط به این مسیر مشاهده کرد.

در مدل یک معادله ای spalart-allmaras :

$$\nu_t = \sqrt{\frac{3}{2}} U_{avg} I l$$

¹⁰ -Turbulence Intensity

که در آن l طول مشخصه توربولانس^{۱۱} که اگر D قطر لوله باشد از رابطه زیر بدست می آید:

$$l = 0.07 D$$

در مدل دو معادله ای k - ϵ داریم:

$$k = \frac{3}{2} (U_{avg} I)^2$$

$$\epsilon = C_{\mu} \frac{k^2}{l}$$

در مدل RSM نیز بدلیل اینکه تنش های رینولدز را بطور صریح نمی دانیم در فلونت از گزینه اجزاء تنش رینولدز^{۱۲} استفاده می کنیم. در این حالت فرض ایزوتروپ بودن جریان را در نظر می گیریم:

$$\overline{u_i u_j} = 0$$

$$\overline{u_{\alpha} u_{\alpha}} = \frac{2}{3} k$$

که k از شدت تنش توربولانس (I) در مرز ورودی بدست می آید.

از طرفی برای بدست آوردن شدت توربولانس در جریان در داخل لوله در حالت توسعه یافته می توان از رابطه تجربی زیر استفاده کرد:

$$I = 0.16 (Re_p)^{-\frac{1}{8}}$$

بدلیل اینکه در مسأله مورد جریان با سرعت یکنواخت وارد لوله می گردد و در ورودی جریان توسعه یافته نیست نمی توانیم از رابطه بالا استفاده کنیم، راه دیگر برای بدست آوردن شدت توربولانس روش سعی و خطا است بصورتیکه شدت توربولانس را از 1٪ آنقدر افزایش می دهیم تا جواب نهایی با تغییرات شدت توربولانس تغییر نکند. نتیجه این محاسبات در جدول 5-1 داده شده است: همانطور که مشاهده می شود تغییر در مقدار ضریب اصطکاک و افت فشار در ناحیه توسعه یافته جریان مشاهده نمیشود. تنها تغییر در تعداد تکرار برای همگرا شدن است

¹¹ -turbulence length scale

¹² -Reynolds-Stress Components



شدت توربولانس	1%	3%	5%	7%
Cf	9.16E-03	9.16E-03	9.16E-03	9.16E-03
افت فشار (pa)	47.05	47.05	47.05	47.05
تعداد تکرار	259	251	249	254

جدول 1-5: ضریب اصطکاک و افت فشار و تعداد تکرار برای شدت توربولانس ورودی مختلف

3-3-2) مرز خروجی:

میتوان به دو صورت شرایط را مرز خروجی را تنظیم کرد:

- 1- شرایط مرزی جریان خروجی^{۱۳}: در این حالت نیاز به تعیین هیچ پارامتر خروجی نیست. با انتخاب این گزینه، فلوننت برای مرز خروجی شار دیفیوژن تمامی متغیرهای جریان را صفر در نظر می گیرد. این برای جریان توسعه یافته صادق است، بنابراین برای مسأله مورد نظر قابل استفاده است.
 - 2- شرط مرزی فشار خروجی^{۱۴}: در مرز خروجی فرض را بر این میگذاریم که جریان در فشار اتمسفر تخلیه میشود؛ بنابراین مرز خروجی را از نوع فشار قرار داده و فشار نسبی را صفر در نظر میگیریم. در این حالت پارامترهای توربولانسی همانند شرط مرزی ورودی تعیین می گردد.
- هر دو شرط مرزی برای مسأله مورد نظر در نظر گرفته شد و نتایج در جدول 2-5 ارائه شده است.

¹³ - Outflow boundary conditions

¹⁴ - Pressure outlet boundary conditions



فشار خروجی	جریان خروجی	شرط مرزی خروجی
0.00916	0.00909	Cf
0.00836	0.00836	Cf تجربی
9.6	8.7	درصد خطا
47.04	47.06	افت فشار
43.09	43.09	افت فشار تجربی
9.17	9.21	درصد خطا

جدول 2-5: مقایسه انواع شرط مرزی خروجی

همانطور که ملاحظه می شود با شرط جریان خروجی مقدار خطای ضریب اصطکاک بدست آمده از حل عددی نسبت به شرط فشار خروجی 0/9٪ کمتر و مقدار خطای افت فشار 0/4٪ بیشتر است؛ بنابراین میتوان نتیجه گرفت که برای جریان توسعه یافته که در مسأله در نظر گرفته شده شرط مرزی جریان خروجی مناسب تر است.

3-3-5) شرط مرزی دیوار:

در شرط مرزی دیواره باید دیوار ثابت در نظر گرفته شود و شرط عدم لغزش برای آن فعال گردد.

بنابراین در این فصل به این نتیجه رسیدیم که برای حل عددی مناسب برای جریان مغشوش در مسأله مورد نظر باید از تابع دیوار اصلاح شده و شرط جریان ورودی با سرعت یکنواخت و شرط جریان خروجی استفاده کرد.

4- حل جریان مغشوش با مدل های مختلف

در این بخش نتایج حل مسأله در حالت مغشوش با 7 مدل توربولانسی بررسی شده است، که در ادامه به اختصار توضیح داده می شود :

1- مدل صفر معادله ای طول اختلاط¹⁵:

در این مدل ویسکریته توربولانس متناسب با گرادیان سرعت در نظر گرفته می شود که نسبت تناسب با طول اختلاط مشخص می شود که رابطه به صورت زیر است:

$$\nu_T = l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|$$

انتظار می رود این بدلیل سادگی غیر کامل بودن (نیاز به تعیین l_m) جواب دقیقی از حل مسأله ندهد.

2- مدل یک معادله ای Spalart-Allmaras :

مدلی یک معادله ای است که برای مدل کردن لزجت توربولانس یک معادله انتقال برای ویسکریته سینماتیکی توربولانس حل می کند که با لزجت توربولانس بصورت زیر رابطه دارد:

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f$$

که در آن f تابعی از نسبت لزجت سینماتیکی توربولانس به لزجت سینماتیکی مولکولی است. البته در نزدیکی دیواره اگر شبکه آنقدر ریز باشد که ناحیه زیر لایه لزج را شامل شود از رابطه :

$$u^+ = y^+$$

استفاده می شود و اگر در لایه میانی قرار گرفته باشد از رابطه لگاریتمی:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+)$$

استفاده می شود که این روابط کاملاً متناسب با نحوه شبکه بندی انجام شده برای این مسأله است. بنابراین انتظار می رود جواب مناسبی از این روش بدست آید.

3- مدل دو معادله ای standard k-ε :

¹⁵ - Mixing Length

در این مدل برای بدست آوردن لزجت توربولانس ، دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی توربولانس^{۱۶} (k) و ضریب اتلاف انرژی جنبشی توربولانس^{۱۷} (ϵ) حل میشود سپس لزجت توربولانس از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

همانطور که پیش از این توضیح داده شد در این مدل برای مدل کردن جریان از سه روش استفاده می شود که متناسب با شرایط این مسأله از تابع دیوار اصلاح شده استفاده شده است.

4- مدل دو معادله ای standard k- ω :

در این مدل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی توربولانس (k) و ضریب اتلاف مخصوص^{۱۸} (ω) حل می شود و ضریب پخش مؤثر بصورت زیر مدل می گردد:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \sigma_k \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}$$

که در آن σ_k و σ_ω عدد پرانتل توربولانس مربوط به k و ϵ هستند و μ_t با رابطه زیر مدل میگردد:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega}$$

که در این رابطه α^* ضریب میرایی لزجت توربولانس است برای تصحیح جواب برای اعداد رینولدز پایین جریان. در این شرایط مرزی دیواره همانند مدل k - ϵ است وقتی که از تابع دیوار اصلاح شده استفاده می گردد؛ یعنی برای شبکه های ریز در نزدیک دیواره تنظیم گردیده است؛ بنابراین انتظار می رود برای مسأله مورد نظر با شبکه عددی مناسبی که در نظر گرفته شده جواب مناسبی بدهد.

5- مدل دو معادله ای SST k- ω :

¹⁶ - turbulence kinetic energy

¹⁷ - dissipation rate

¹⁸ - specific dissipation rate

این روش یک مدل اصلاح شده روش standard k- ω است که نسبت به آن دارای ویژگی های زیر می باشد:

- تغییرات تدریجی از مدل standard k- ω در ناحیه داخلی لایه مرزی به مدل k- ϵ در بخش خارجی لایه مرزی.
- اصلاح فرمول لزجت توربولانس برای محاسبه اثرات انتقال تنش اصلی برشی توربولانس.
- با توجه به اصلاحات ذکر شده انتظار می رود این مدل نسبت به مدل standard k- ω جواب دقیقتری ارائه دهد.

6- مدل پنج معادله ای تنش رینولدز^{۱۹} (RSM) :

- در حالت دو بعدی این روش سه معادله انتقال تنش های رینولدز $\overline{u_i u_j}$ ته همراه دو معادله k- ϵ بمنظور بدست آوردن تنش های رینولدز و جایگذاری در معادله ممنتیم متوسط حل می گردد. یکی از تدم هی معادلات انتقال، عبارت کرنش فشار^{۲۰} است که در فلوئنت به سه صورت مدل می شود.
- مدل کرنش فشاری خطی^{۲۱} :
 - که در آن کرنش فشاری بصورت خطی و با ضرایب ثابت مدل می شود.
 - اصلاح مدل خطی برای رینولدز پایین^{۲۲} :
 - در این روش ضرایب مدل خطی تابع عدد رینولدز توربولانس بوده و با نزدیک شدن به دیواره تنش های رینولدز را کاهش می دهد و برای حالت تابع دیوار اصلاح شده مناسب است.
 - مدل کرنش فشاری درجه دوم^{۲۳} :
 - این مدل برای جریان های برشی مانند کرنش صفحه ای ، جریان چرخشی ، انقباض و انبساط مناسب است.

¹⁹ - Reynolds stress model

²⁰ - pressure-strain

²¹ - Linear Pressure-Strain Model

²² - Low-Re Modifications to the Linear Pressure-Strain Model

²³ - Quadratic Pressure-Strain Model

در این مسأله ما از دو مدل خطی تابع دیوار اصلاح شده و اصلاح رینولدز پایین به همراه ترم اتلاف (2) استفاده خواهیم کرد که به نظر می رسد مدل دوم با توجه به ریز بودن شبکه در نزدیکی دیوار مناسب تر باشد.

در نهایت مسأله مغشوش معرفی شده در مقدمه این گزارش با مدل ها معرفی شده در بالا بوسیله کامپیوتری با سرعت 2.2 GHz و حافظه 2GB حل گردید که نتایج حاصل در جدول 1-4 ارائه شده است.

همانطور که در مشاهده می شود نتایج بدست آمده، با پیش بینی هایی که در بالا، درباره مدل های توربولانسی انجام دادیم تقریباً مطابقت دارد بطوریکه با توجه به شبکه بندی دامنۀ حل ($y^+ < 1$)، مدلهایی که از روش مناسب برای مدل اثرات دیوار استفاده میکنند و اثرات رینولدز های پایین را در نظر می گیرند دارای جواب دقیق تری هستند یعنی مدل های $k-\omega$ -SST و ω -low reynolds-stress RSM که از هر دو روش، تابع دیوار اصلاح شده²⁴ و اصلاح رینولدز های پایین²⁵ استفاده می کنند جواب هایی با کمترین خطای ممکن را داده اند که در این میان مدل ω -low reynolds-stress RSM بدلیل استفاده از معادلات انتقال تنش های رینولدز جواب هایی با کمتر از 1٪ خطا را ارائه داده است. از طرفی مدل طول اختلاط بعلت سادگی بیش از حد و عدم در نظر گرفتن ملاحظات نزدیک دیواره، جوابی کاملاً اشتباه داده است که از نظر مهندسی قابل قبول نیست.

مدل spalart-almaras بدلیل در نظر گرفتن مدل دو لایه ای در نزدیک دیواره که مطابق با شبکه بندی انجام شده در مسأله است جواب قابل قبول با خطایی حدود 2٪ می دهد.

مدل standard $k-\epsilon$ جوابی با تقریباً 10٪ خطا می دهد در حالی که مدل standard $k-\omega$ جوابی نسبتاً دقیق با خطای حدود 4٪ می دهد که همانطور که در توضیحات مدل به آن اشاره شد علت آن داشتن ضریب اصلاح اثرات رینولدز پایین در نزدیک دیوار در معادلات مدل $k-\omega$ است که باعث کاهش k در نزدیک دیوار می شود و به واقعیت نزدیک تر است.

²⁴ -Enhanced wall treatment

²⁵ -low Reynolds correction

جدول 4-1: مقایسه مدل های توربولانس در جریان مغشوش

مدل های توربولانسی	صفر معادله ای	یک معادله ای	دو معادله ای			پنج معادله ای	
	طول تداخل mixing) (length	spalart- almaras	k-ε standard	k-ω standard	k-ω SST	RSM linear presure - strain	RSM low reynolds- stress ω
ضریب اصطکاک C_f	0.02033	0.00855	0.00916	0.00876	0.00865	0.00939	0.008318
ضریب اصطکاک تجربی	0.008364	0.008364	0.008364	0.008364	0.008364	0.008364	0.008364
درصد خطای C_f	143.07	2.22	9.52	4.73	3.42	12.27	0.55
افت فشار (pa)	104.48	43.96	47.06	45.05	44.43	48.26	42.74
افت فشار تجربی	43.09	43.09	43.09	43.09	43.09	43.09	43.09
درصد خطای افت فشار	142.47	2.02	9.21	4.55	3.11	12.00	0.81
تعداد تکرار	427	427	249	400	532	1403	876
زمان حل (s)	68	86	63	92	148	463	267

چنانچه هزینه محاسبات (زمان حل) را بعنوان یک پارامتر مهم در مقایسات خود وارد کنیم ملاحظه می شود که مدل $k-\epsilon$ standard با توجه به اینکه دارای خطایی کمتر از 10٪ است، سریعترین مدل مقایسه شده است در صورتیکه مدل ω low reynolds-stress با وجود اینکه جواب دقیقی داده است ولی زمان حلی در حدود 4 برابر مدل $k-\epsilon$ دارد و مدل های $k-\omega$ که جوابهایی با خطای تقریباً 4٪ زمانی در حدود 2 برابر زمان مدل $k-\epsilon$ دارند.

به نظر می رسد مدل یک معادله ای $spalart-almaras$ مناسب ترین مدل برای مسأله مورد نظر با توجه به نوع شبکه بندی آن است زیرا با زمان حل نسبتاً کم جوابی با حدود 2٪ خطا می دهد.

5- نتایج حل عددی جریان آرام، گذرا و مغشوش

1-5- جریان آرام

در این بخش نتایج حاصل از حل عددی جریان آرام که در مقدمه این گزارش مشخصات آن تعریف شده، با استفاده از روش های آرام و مغشوش در نرم افزار فلوئنت ارائه شده؛ که در جدول 1-5 قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در جریان آرام به روش مغشوش از مدل یک معادله ای، که در فصل قبل بعنوان مدل بهینه معرفی شد، استفاده شده است.

جدول 1-5: حل جریان آرام به دو روش آرام و مغشوش

جریان آرام	ضریب اصطکاک C_f	ضریب اصطکاک تجربی	درصد خطا ضریب اصطکاک	افت فشار عددی (pa)	افت فشار تجربی	درصد خطا افت فشار
حل عددی آرام	0.0321	0.03212	0.06	0.639	0.64	0.16
حل عددی مغشوش	0.0344	0.03212	7.10	0.686	0.64	7.19

همانطور که مشاهده می شود حل جریان آرام با روش آرام در حدود 0/1٪ خطا را نشان میدهد و روش مغشوش تقریباً 8٪ خطا دارد. دقیقتر بودن روش آرام در حل جریان آرام بدیهی است زیرا روش حل با حالت جریان مطابقت دارد ولی در روش مغشوش نیز جواب مناسبی با خطای معقول از نظر مهندسی بدست آمده است. ما انتظار داشتیم که در روش مغشوش جواب به سمت عددی که از رابطه تجربی مغشوش حاصل می شود همگرا گردد یعنی به عدد:

$$C_f = \frac{0.0791}{498^{\frac{1}{4}}} = 0.0167$$

در صورتیکه نتایج عددی نشان دهنده این است که جواب به سمت جواب دقیق جریان آرام یعنی :

$$C_f = \frac{16}{498} = 0.03212$$

همگرا می گردد که شاید دلیل آن را بتوان اینگونه توجیح کرد که چون اکثر مدل های مغشوش همان معادلات ناویراستوکسی را حل می کنند که در روش آرام حل می شود با این تفاوت در این معادلات از لزجت مؤثر که مجموع لزجت مولکولی و لزجت توربولانس است استفاده می کند یعنی:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

و تنها ترم μ_t را مدل می کنند و در این مدل ها μ_t متناسب با رینولدز جریان در نظر گرفته میشود یعنی هر چه رینولدز جریان کمتر باشد اثر μ_t در رابطه بالا کاهش می یابد و رابطه تبدیل می شود به:

$$\mu_{eff} = \mu$$

بنابراین در روش مغشوش برای رینولدز های کم تقریباً همان معادلات ناویراستوکسی حل می شود که در روش آرام حل می گردد و انتظار می رود جوابی تقریباً نزدیک به نتایج تجربی و حل آرام حاصل شود

5-2- جریان گذار

در این حالت از جریان بدلیل اینکه رابطه تجربی مناسبی برای مقایسه جواب ها ارائه نشده است بنابراین از نتایج تجربی ارائه شده از مرجع [3] استفاده می کنیم و به دلیل اینکه در این قطر لوله در نظر گرفته شده در این مسأله با قطر لوله آزمایش شده در مقاله یکی نیست باید از عدد بی بعد ضریب فشار طبق تعریف زیر بجای اختلاف فشار استفاده کنیم

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$



از طرفی باید رینولدز جریان را برابر رینولدزی که در مقاله ذکر شده اعلام شده است قرار دهیم تا بتوان نتایج عددی را با نتایج تجربی مقایسه کرد. نتایج این حالت از جریان در جدول 5-2 ارائه شده است. با توجه به رابطه جریان آرام برای ضریب اصطکاک ملاحظه می شود که نتایج تجربی توافق کاملی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

$$C_f = \frac{16}{2190.6} = 0.0073$$

این نکته نشان می دهد که حالت جریان در عمل به حالت آرام کاملاً نزدیک است. رابطه بلازیوس برای این حالت از جریان صادق نیست زیرا:

$$C_f = \frac{0.0791}{2190.6^{\frac{1}{4}}} = 0.01156$$

و این عدد اختلاف زیادی بانیاتج تجربی دارد.

همانطور که در جدول 5-2 مشاهده می شود حل آرام جریان گذار جواب های دقیقی می دهد در صورتیکه جواب های بدست آمده از حل مغشوش با نتایج تجربی فاصله زیادی دارد و خطاها از محدوده خطای مهندسی خارج شده است.



جدول 5-2: مقایسه حل جریان گذار به دو روش آرام و مغشوش

جریان گذار	ضریب اصطکاک	ضریب اصطکاک تجربی	درصد خطا ضریب اصطکاک	ضریب فشار	ضریب فشار تجربی	درصد خطا ضریب فشار
حل آرام	0.00729	0.0073	0.14	2.91	2.97	2.02
حل مغشوش	0.01322	0.0073	81.10	5.275	2.97	77.61

ممکن است یکی از دلایل خطای زیاد در روش مغشوش، مدل کردن اثر اغتشاشات ناچیز و گذرا در جریان گذار بصورت نادرست باشد بطوریکه با افزایش رینولدز جریان از حالت آرام به گذار، مدل های توربولانسی مقدار لزجت توربولانس جریان را بیش از اندازه تخمین زده و اثرات اغتشاشات را بیشتر از حالت واقعی در نظر می گیرند بنابراین ضریب اصطکاک بدست آمده از این روش بسیار کمتر از حالت واقعی خواهد بود که داده های جدول 2-7 این نکته را تأیید می کند.

5-3- جریان مغشوش

در این بخش نتایج حاصل از حل جریان مغشوش به روش های آرام و مغشوش ارائه شده. لازم به ذکر است که در حل به روش مغشوش از مدل توربولانس یک معادله ای که در فصل قبل بعنوان مدل بهینه معرفی شد استفاده می گردد.

همانطور که در جدول 5-3 مشاهده می شود حل آرام جریان مغشوش جوابهایی بسیار متفاوت با جواب های تجربی می دهد. در واقع مقدار ضریب اصطکاک روش آرام به عددی که از رابطه آرام بدست می آید یعنی:

$$C_f = \frac{16}{8000} = 0.002$$

همگرا می گردد که این عدد بدلیل در نظر نگرفتن گرادیان شدید سرعت در نزدیکی دیواره بعلت مغشوش شدن جریان کمتر از مقدار واقعی است و طبیعی است که روش آرام با در نظر نگرفتن اغتشاشات جریان به این عدد همگرا گردد. ولی روش مغشوش با مدل کردن لزجت توربولانس و حل معدلات ناویراستوکس و در نظر گرفتن اثرات دیواره بر اغتشاشات جریان توانسته است با خطایی در حدود 2٪ به عددی که از رابطه تجربی بلازیوس بدست می آید یعنی:

$$C_f = \frac{0.0791}{8000^{\frac{1}{4}}} = 0.008364$$

همگرا گردد.

جدول 3-5: حل جریان مغشوش به دو روش آرام و مغشوش

جریان مغشوش	ضریب اصطکاک	ضریب اصطکاک تجربی	درصد خطا ضریب اصطکاک	افت فشار (pa)	افت فشار تجربی (pa)	درصد خطا افت فشار
حل عددی آرام	0.001998	0.008364	76.11	10.290	43.09	76.12
حل عددی مغشوش	0.00855	0.008364	2.22	43.96	43.09	2.02

بنابراین می توان بطور کلی نتیجه گیری کرد که روش مغشوش بجز در حالت گذار جواب های مناسبی حتی در جریان آرام می دهند ولی روش آرام فقط در جریان های آرام و تا حدودی در ناحیه گذار جواب های معقول داده در ناحیه مغشوش توانایی تخمین جواب را ندارد.



6- جمع بندی

در پروژه انجام شده قبل از هر نکته دیگر به قابلیت های نرم افزار فلوئنت آشنا شدیم و تا حدودی به توانایی این نرم افزار برای حل جریان سیال پی بردیم.

با انجام دادن مطالعه شبکه عددی با این نتیجه رسیدیم که شبکه عددی غیر یکنواخت با المان های مستطیلی که در آن شبکه با نزدیک شدن به دیوار ریزتر می شود مناسب رای حل این مسأله بوده و همچنین با بررسی همگرایی شبکه به این نتیجه رسیدیم که ریزتر کردن شبکه از یک حد معینی نه تنها باعث دقیق تر شدن جواب نمی شود بلکه هزینه محاسبات را افزایش می دهد. سپس با بررسی مدل های مختلف اغتشاشی دریافتیم که مدل هایی که از تابع دیوار اصلاح شده^{۲۶} و اصلاحات اثرات رینولدزپایین^{۲۷} استفاده می کنند ، دقیق ترین جواب ها را می دهند و در نهایت نتیجه گرفتیم که برای این مسئله مدل یک معده ای **spalart-almaras** که از مدل دولایه ای درنزدیک دیوار استفاده می کند بهینه ترین روش از نظر دقت و هزینه محاسبات است.

با حل سه حالت جریان با روش های آرام و مغشوش به این نتیجه رسیدیم که مدل های توربولانسی برای جریان آرام جواب قابل قبولی می دهند در حالی که روش آرام برای جریان مغشوش مناسب نیست. از طرفی در ناحیه گذار، روش آرام جواب دقیقی می دهد و مدل مغشوش قادر به حل صحیح جریان نیست ؛ بنابراین می توان به این نتیجه رسید که در مواردی که هر سه حالت جریان در دامنه حل اتفاق می افتد، استفاده از مدل های توربولانسی برای کل جریان می تواند تقریب خوبی از حل مسأله بدهد در حال که روش آرام برای این حالت مناسب نیست.

²⁶ -Enhanced wall treatment

²⁷ -Low-Re Modifications

7- منابع

- 1- kays, Crawford, weigand, convective heat and mass transfer, McGRAW-HILL, 2005
- 2- irving H Shames, mechanics of fluids
- 3- Joseph Sutalo, LABORATORY 5, MMAE 310,
- 4- FLUENT 6.2 User's Guide, Fluent Inc, January 2005
- 5- Simulation of Turbulent Flows, ME469B/3/GI