

به نام خدا

مدلسازی جریان سیال در محفظه با
سرپوش متحرک

LBMiran.blog.ir

فهرست مطالب

۱- چکیده	۳
۲- راهنمای کاربری	۴
نمونه اجرا	۵
نتایج نمونه اجرا شده و مقایسه با مقالات معتبر	۱۰
۳- متن اصلی برنامه Main	۲۷
۴- سابروتین Pre_Solution	۳۱
۵- سابروتین Fluid_Flow	۳۳
۶- سابروتین Residual	۳۹
۷- سابروتین Output	۴۰
۸- سابروتین After_Solution	۴۲
۹- منابع و مراجع	۴۳

۱- چکیده

در این برنامه برای مدلسازی جریان در محفظه‌ای با سرپوش متحرک، از روش شبکه بولتزمن با مدل سرعتی D2Q9 برای محاسبه جریان سیال استفاده شده است. گفتنی است که برای دیواره‌های ثابت از شرط مرزی بازگشت به عقب و برای دیواره متحرک از شرط مرزی سرعت معلوم استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای به حداقل رساندن تعداد پارامترها، تمام ورودی و خروجی‌ها اعداد بی‌بعد هستند و برای وارد کردن آنها از فایل‌های همراه کد استفاده می‌شود و نیازی به ورود به بدنه کد نمی‌باشد. جهت اعتبارسنجی کد از حل‌های معیار معتبر استفاده شده است.

کلمات کلیدی: روش شبکه بولتزمن، محفظه با سرپوش متحرک

۲- راهنمای کاربری

این نرم افزار توسط وبلاگ LBMiran.blog.ir نگارش شده است. نسخه حاضر Version:1.0 می باشد. لازمه اجرای برنامه آشنایی با نحوه وارد کردن اطلاعات ورودی به برنامه است لذا در این بخش به تفصیل به این موارد اشاره خواهد شد. گفتنی است که این قسمت مخصوص کاربرانی است که فقط می خواهند نرم افزار را اجرا نموده و استفاده نمایند. لذا هیچ اشاره ای به محتوای برنامه اعم از سابروتین ها و روش حل نشده است.

هندسه مورد بررسی کد حاضر در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. دیواره بالایی دارای سرعتی افقی در راستای محور x داشته و سایر دیوارها ثابت هستند. مختصات و نام گردابه هایی که ممکن است تشکیل شوند در شکل ۱-۲ قابل ملاحظه هستند. فرض بر این است که نانوسیال نیوتنی و جریان سیال آرام و تراکم ناپذیر بوده و نانوذرات سرعتی برابر با جریان داشته باشند.

پارامترهای هندسی که شامل تعداد شبکه در راستای افقی n و تعداد شبکه در راستای عمودی m هستند، در حین اجرای برنامه از کاربر خواسته می‌شوند. نکته قابل توجه این است که این مقادیر هرچه بیشتر باشند دقت پاسخ‌های مسئله بیشتر می‌شود ولی به همان میزان زمان همگرایی و هزینه محاسباتی افزایش می‌یابد.

گفتنی است که در حقیقت پارامترهای بیشتری مثل معیار همگرایی و سرعت بی‌بعد ورودی ... هستند که می‌توانند بر پاسخ‌ها اثر بگذارند ولی با توجه به اینکه وارد کردن آنها نیاز به تجربه کافی در روش شبکه بولترمن دارد، برای اجتناب از پیچیدگی کار با کد، مناسب‌ترین آنها برای رینولدزهای متداول مربوط به جریان در ریزمجراها در کد ثابت شده اند.

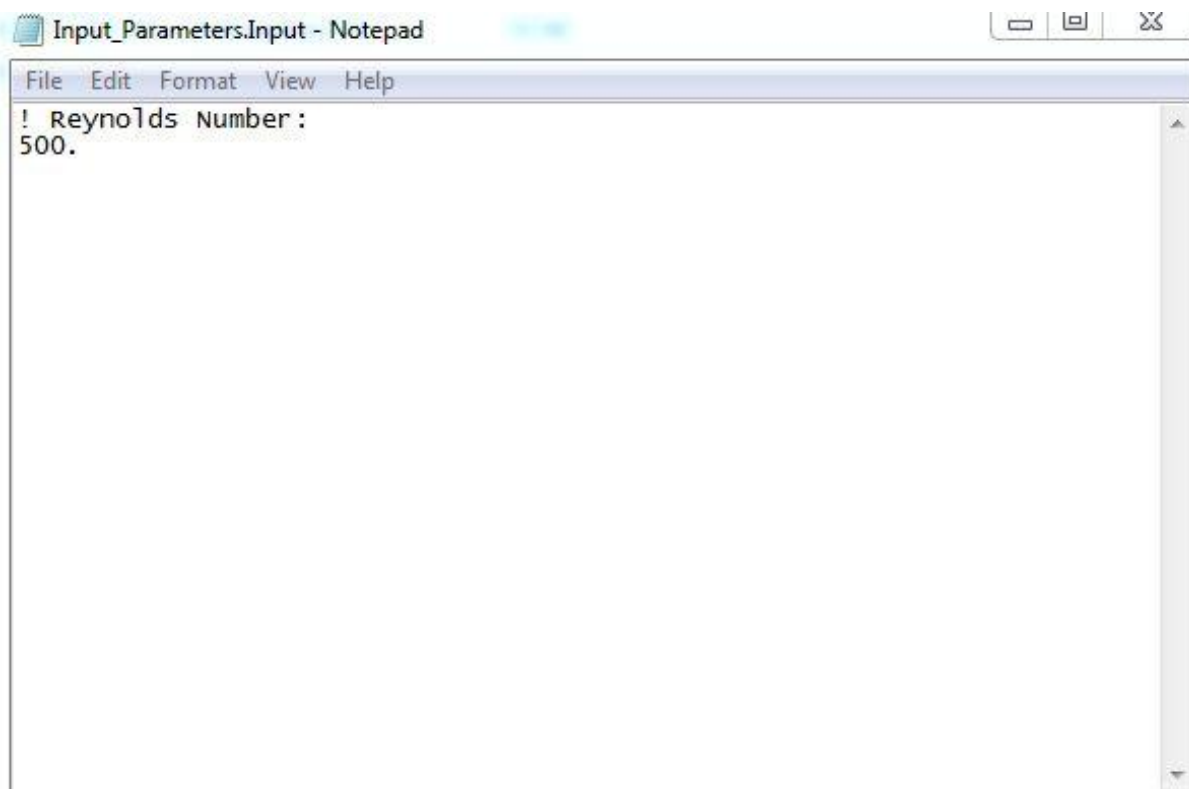
توضیحات فوق برای اجرا و استفاده از برنامه کافی است. پس از اجرا و همگرایی برنامه، فایل خروجی Result تشکیل می‌گردد. این فایل‌ها شامل کانتورهای فشار، سرعت‌ها و خطوط جریان هستند که در نمونه اجرا نمایش داده خواهد شد.

نمونه اجرا

در این بخش به منظور تمرین عملی موارد بالا به یک مثال اشاره کرده و جهت اعتبارسنجی با مقالات معتبر مقایسه خواهیم نمود.

گام اول:

باید فایل Input_Parameters.input را با نرم‌افزار Notepad باز کرده و عدد رینولدز را وارد نمود.

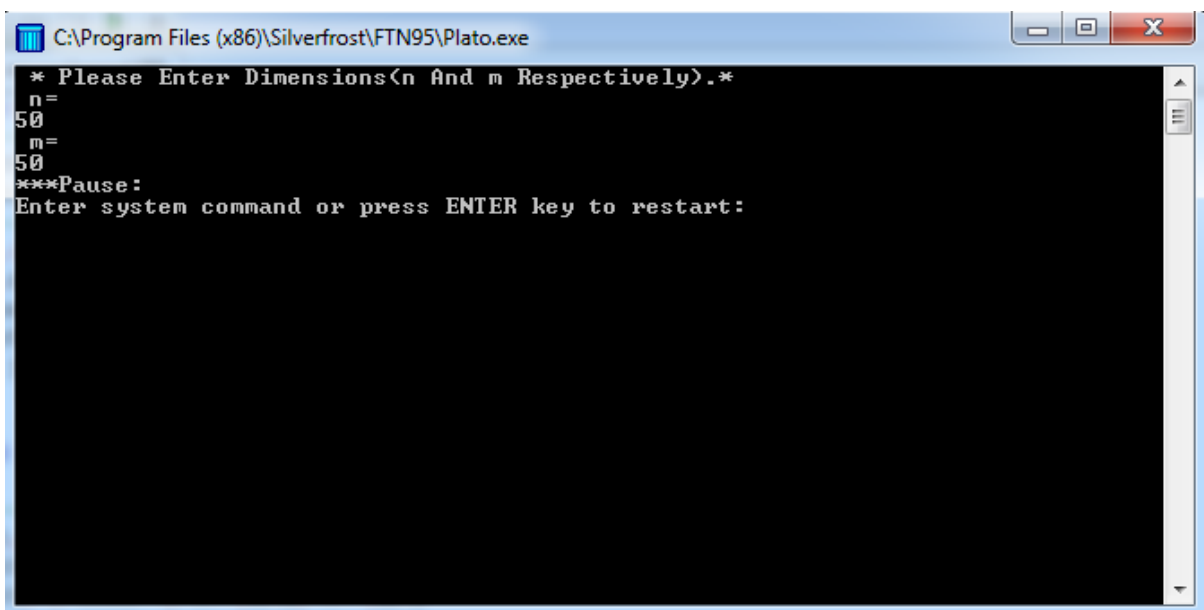


شکل ۲-۲: وارد کردن پارامترهای فیزیکی

در اینجا برای نمونه رینولدز 100 قرار داده شده است.

گام دوم:

در مرحله آخر روی فایل Driven Cavity.EXE راست کلیک کرده و گزینه Run as administrator را انتخاب می‌نماییم. سپس نرم‌افزار اجرا شده و تعداد شبکه را می‌خواهد، پس از وارد کردن به ترتیب هر کدام از مقادیر n و m ، کلید Enter را فشار می‌دهیم.



```
C:\Program Files (x86)\Silverfrost\FTN95\Plato.exe
* Please Enter Dimensions(n And m Respectively)*
n=
50
m=
50
***Pause:
Enter system command or press ENTER key to restart:
```

شکل ۲-۳: وارد کردن ابعاد شبکه

در اینجا ابعاد 50×50 انتخاب شده‌است.

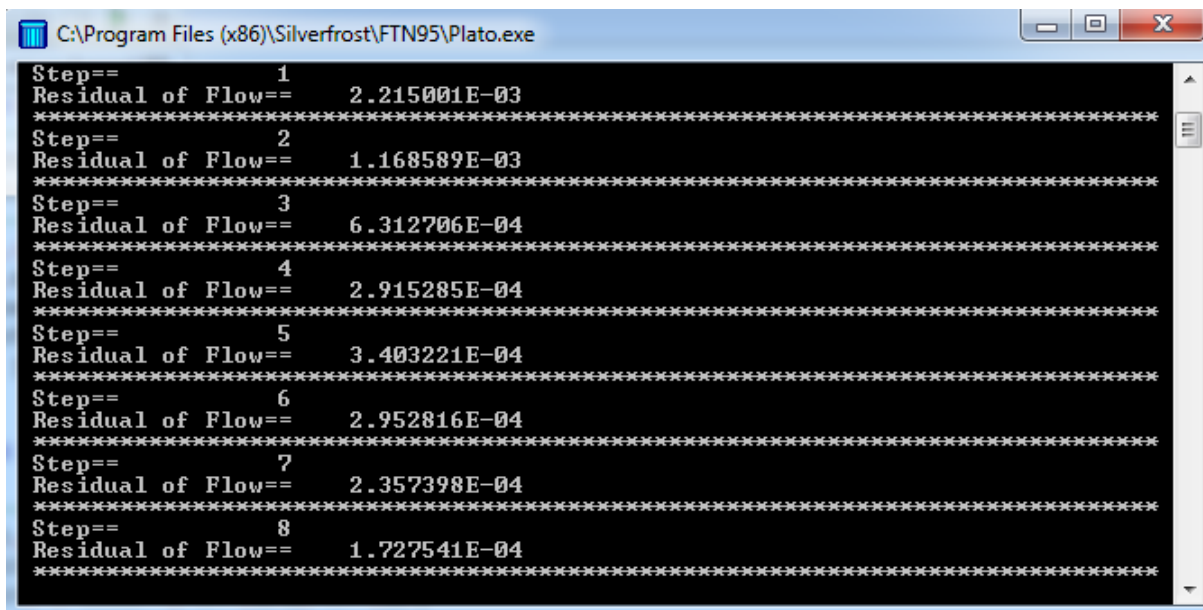
گام سوم:

در این مرحله پس از فشار دوباره کلید Enter، فرایند اجرای برنامه شروع شده و گزارشاتی شامل از روند حل نمایش داده می‌شود که توضیحات آن در جدول ۳-۲ آورده شده است.

جدول ۳-۲: توضیح گزارشات حین اجرای برنامه

متغیر داخل برنامه	تعریف متغیر
Step	شمارنده گام زمانی است
Residual Of Flow	معیار همگرایی جریان است و کوچک شدن آن نشانه پیشروی به سمت همگرایی است.

نمایش گزارشات اجرای برنامه در شکل زیر نشان داده شده است.



```
C:\Program Files (x86)\Silverfrost\FTN95\Plato.exe
Step== 1
Residual of Flow== 2.215001E-03
*****
Step== 2
Residual of Flow== 1.168589E-03
*****
Step== 3
Residual of Flow== 6.312706E-04
*****
Step== 4
Residual of Flow== 2.915285E-04
*****
Step== 5
Residual of Flow== 3.403221E-04
*****
Step== 6
Residual of Flow== 2.952816E-04
*****
Step== 7
Residual of Flow== 2.357398E-04
*****
Step== 8
Residual of Flow== 1.727541E-04
*****
```

شکل ۲-۴: نمایش گزارشات حین اجرای برنامه

گام چهارم:

پس از ارضا شدن شرایط همگرایی، پنجره اجرا خود به خود بسته شده و یا در صورت اجرا برنامه در نرم افزار Fortran گزارشی به صورت زیر به نمایش در خواهد آمد:

Solution Has Finished!

Thanks for Using This Code.

اجرا برنامه توسط یک رایانه (Laptop) با پردازشگر Intel(R) Core(TM) i5-2430M CPU @ 2.40GHz انجام شده و در حدود ۵۵ ثانیه به طول انجامید.

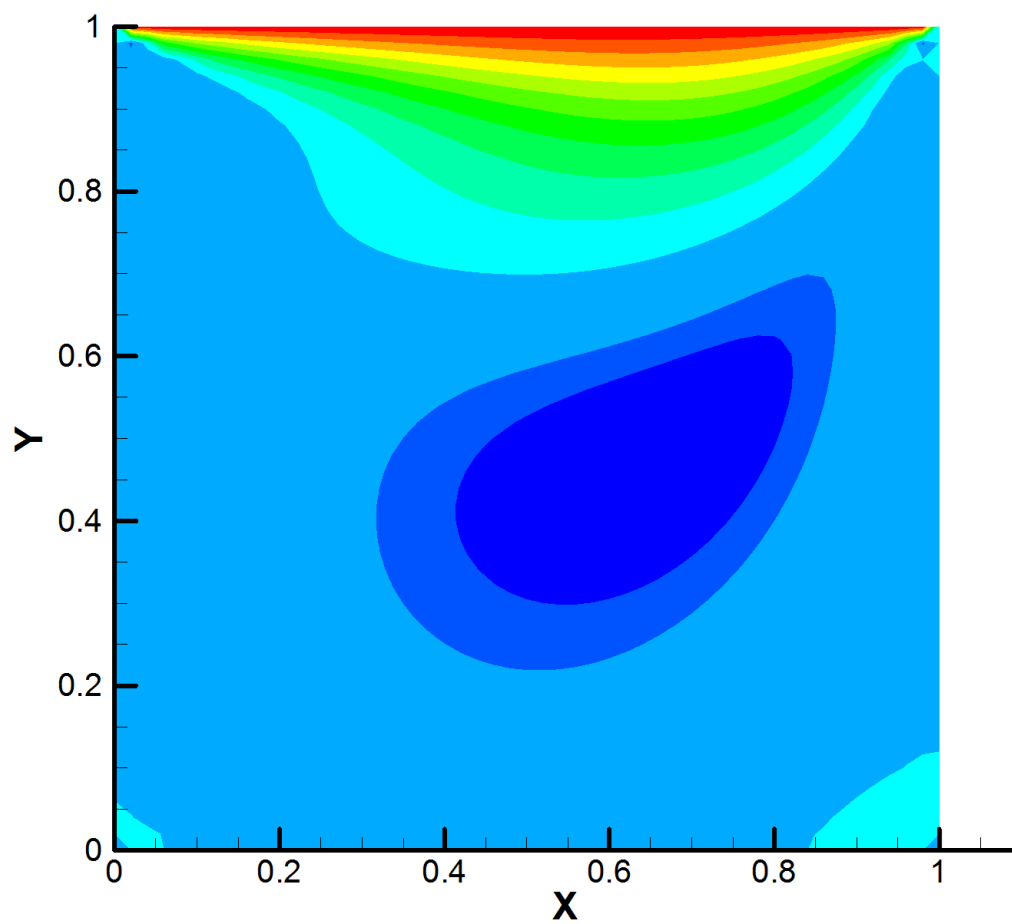
گام پنجم:

در نهایت فایل Result.dat حاوی کانتورهای خط جریان و سرعت‌ها آماده خواهد بود. گفتی است که این فایل در حین اجرای برنامه هم قابل مشاهده است.

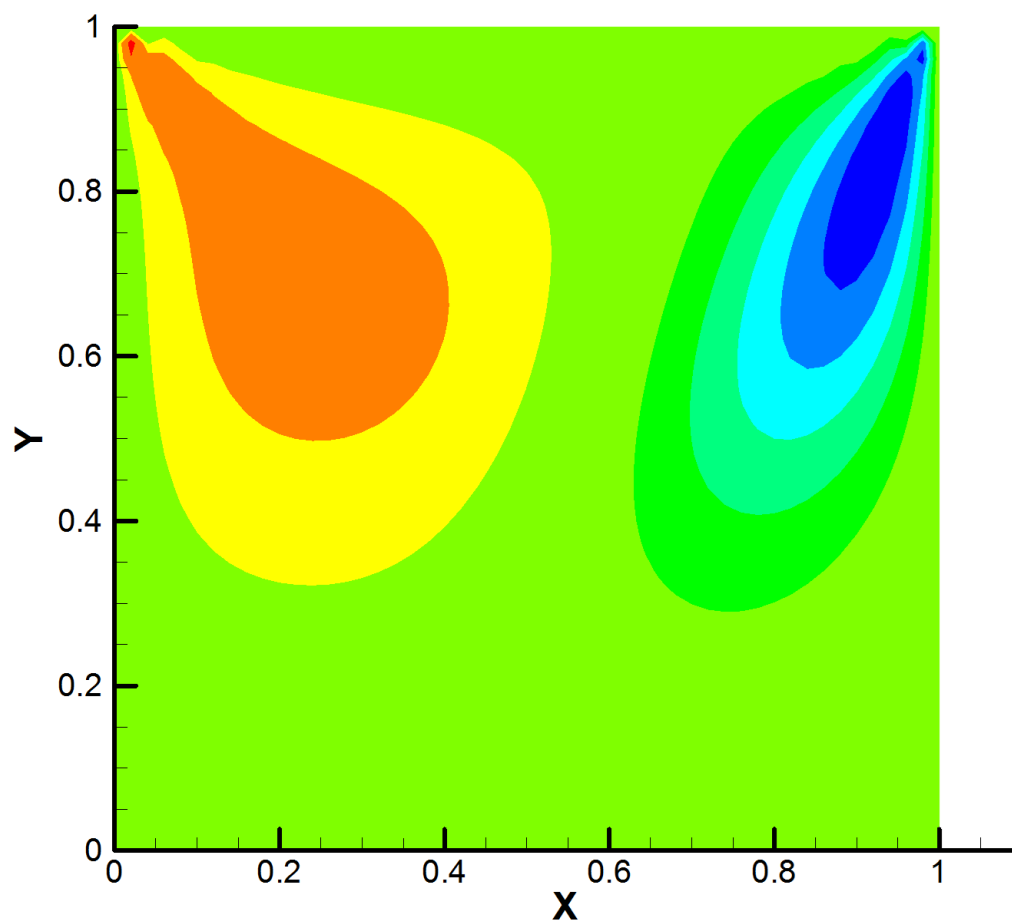
در انتهای این بخش کانتورها و نمودارهای نمونه اجرا شده نشان داده شده و محل گردابه‌ها که مناسبترین ابزار برای اعتبارسنجی کد حاضر است، با معتبرترین و مشهورترین مقاله موجود در این زمینه مقایسه خواهد شد.

نتایج نمونه اجرا شده و مقایسه با مقالات معتبر

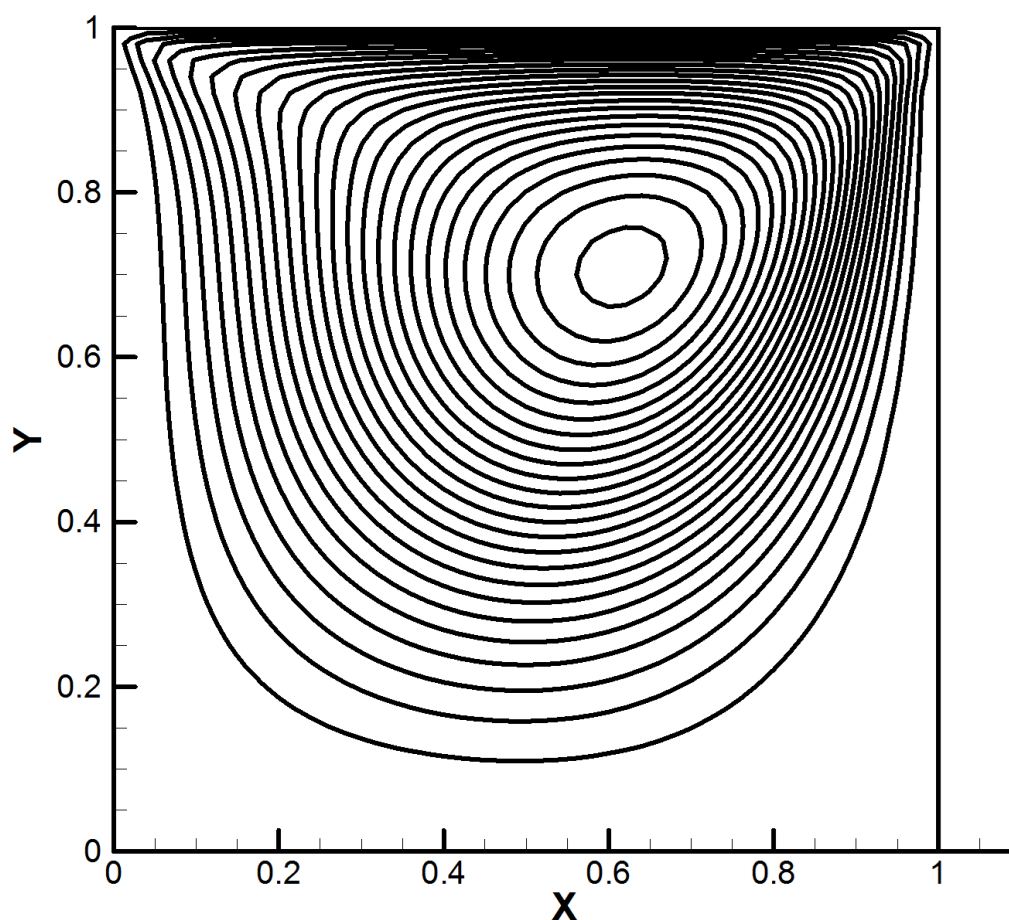
در این قسمت کانتورها و نمودارهای نمونه اجرا شده نشان داده شده و محل گردابه‌ها با معتبرترین و مشهورترین مقاله موجود در این زمینه مقایسه شده است.



شکل ۲-۵: کانتور سرعت افقی نمونه اجرا شده ($Re = 100$)

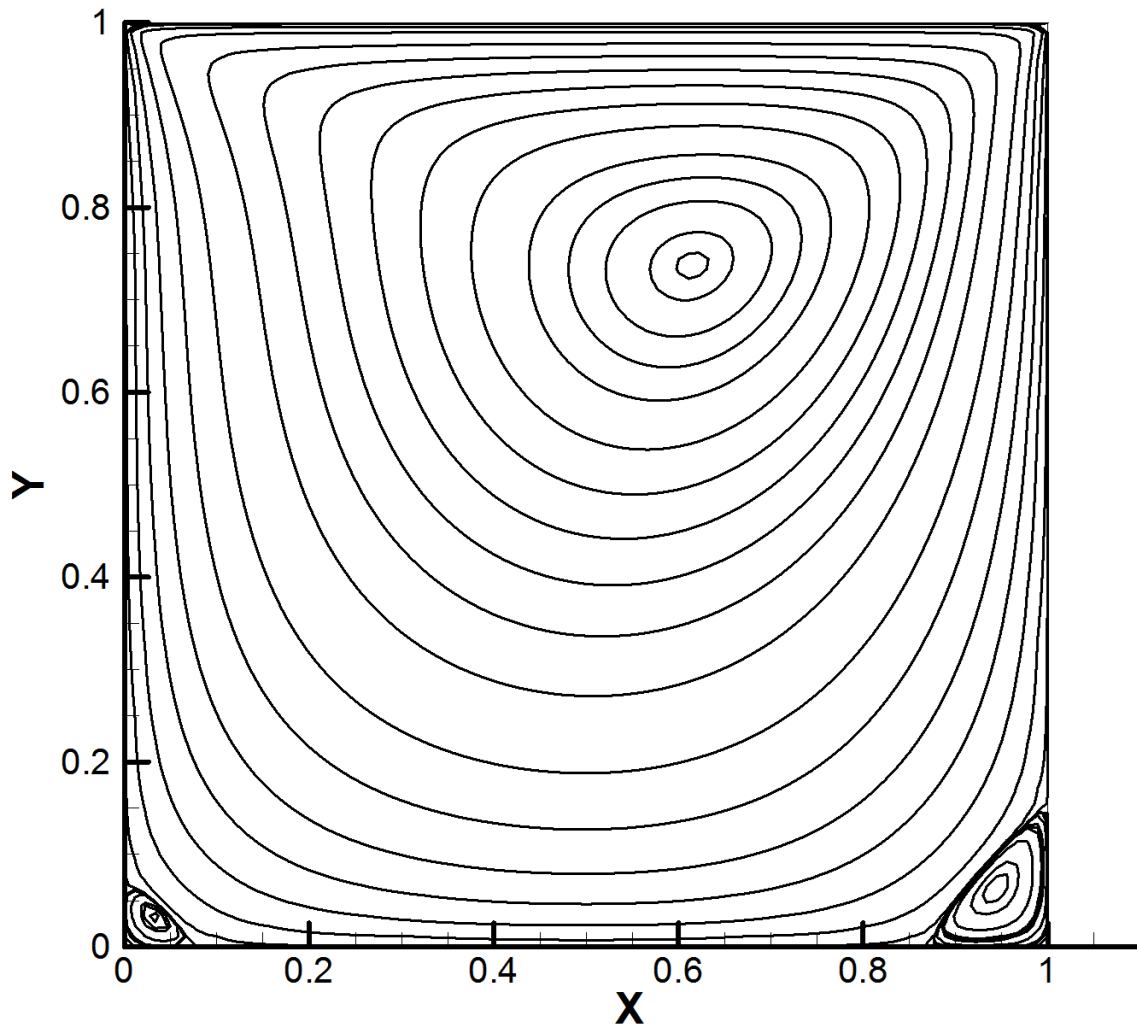


شکل ۲-۶: کانتور سرعت عمودی نمونه اجرا شده ($Re = 100$)



شکل ۲-۷: خطوط جریان نمونه اجرا شده ($Re = 100$)

در شکل‌های زیر خطوط جریان برای رینولدزهای مختلف آورده شده و محل گردابه‌ها در جدول زیر آن با مراجع مقایسه شده است. جهت رسیدن به این نمودارها مطلوب آن است که معیار همگرایی تا حد امکان کوچک قرار داده شود و در صورت همگرایی با کلید ترکیبی $Ctrl+C$ اجرا برنامه متوقف گردد.

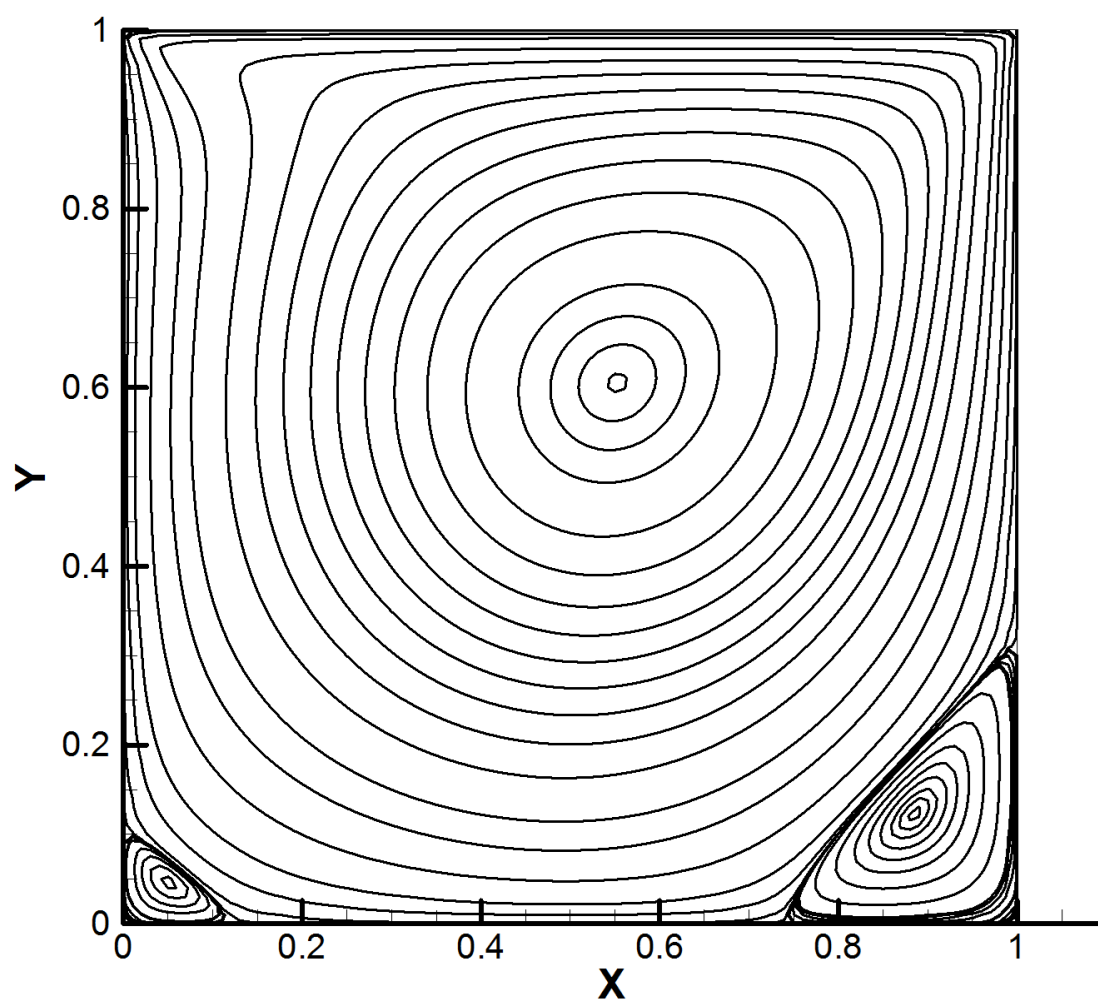


Re=100

Re=100

Vortex	Property	Ghia et al.	Our results
Primary	Location, x ,y	0.6172, 0.7344	0.6154, 0.7359
T1	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-

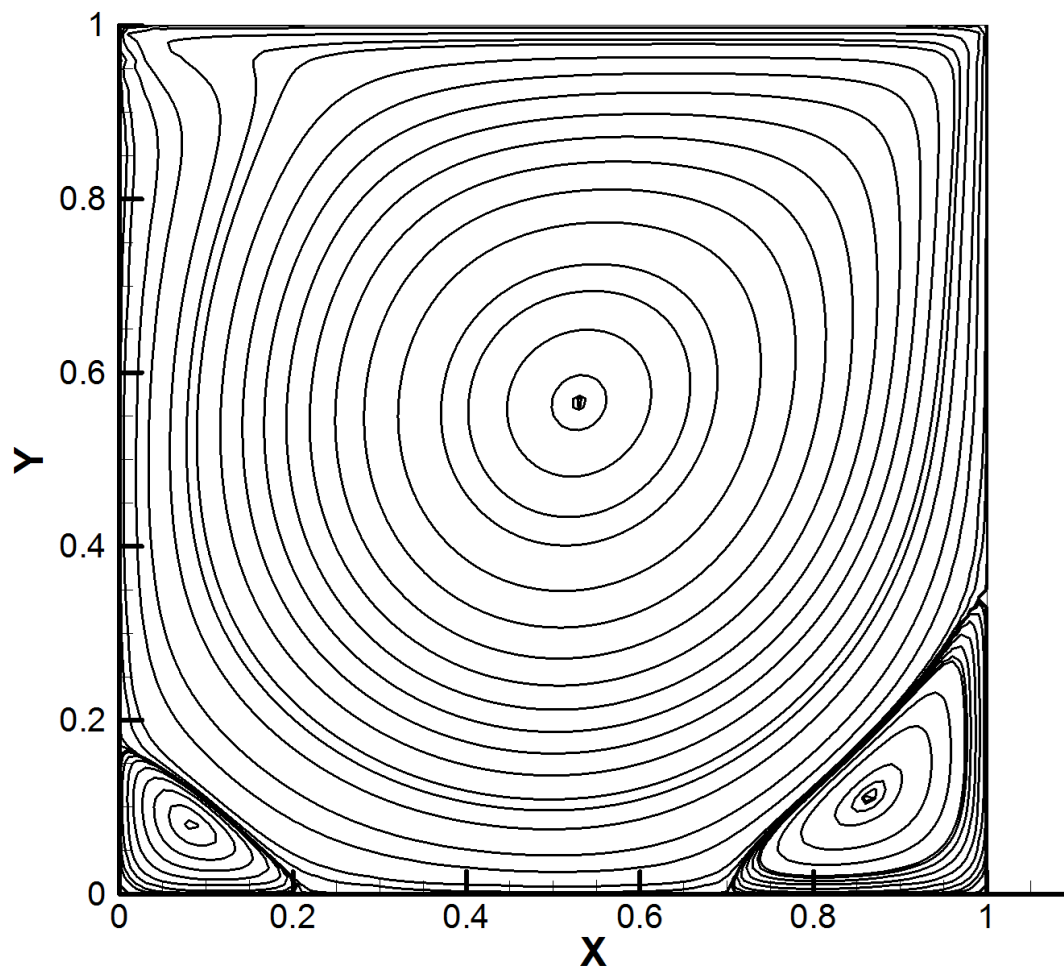
	V _L	-	-
BL1	Location, x ,y	0.0313, 0.0391	0.0315, 0.0374
	H _L	0.0781	0.0780
	V _L	0.0781	0.0780
BR1	Location, x ,y	0.9453, 0.0625	0.9430, 0.0617
	H _L	0.1328	0.1317
	V _L	0.1484	0.1500
BL2	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-
BR2	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-
BR3	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-



Re=400

Re=400

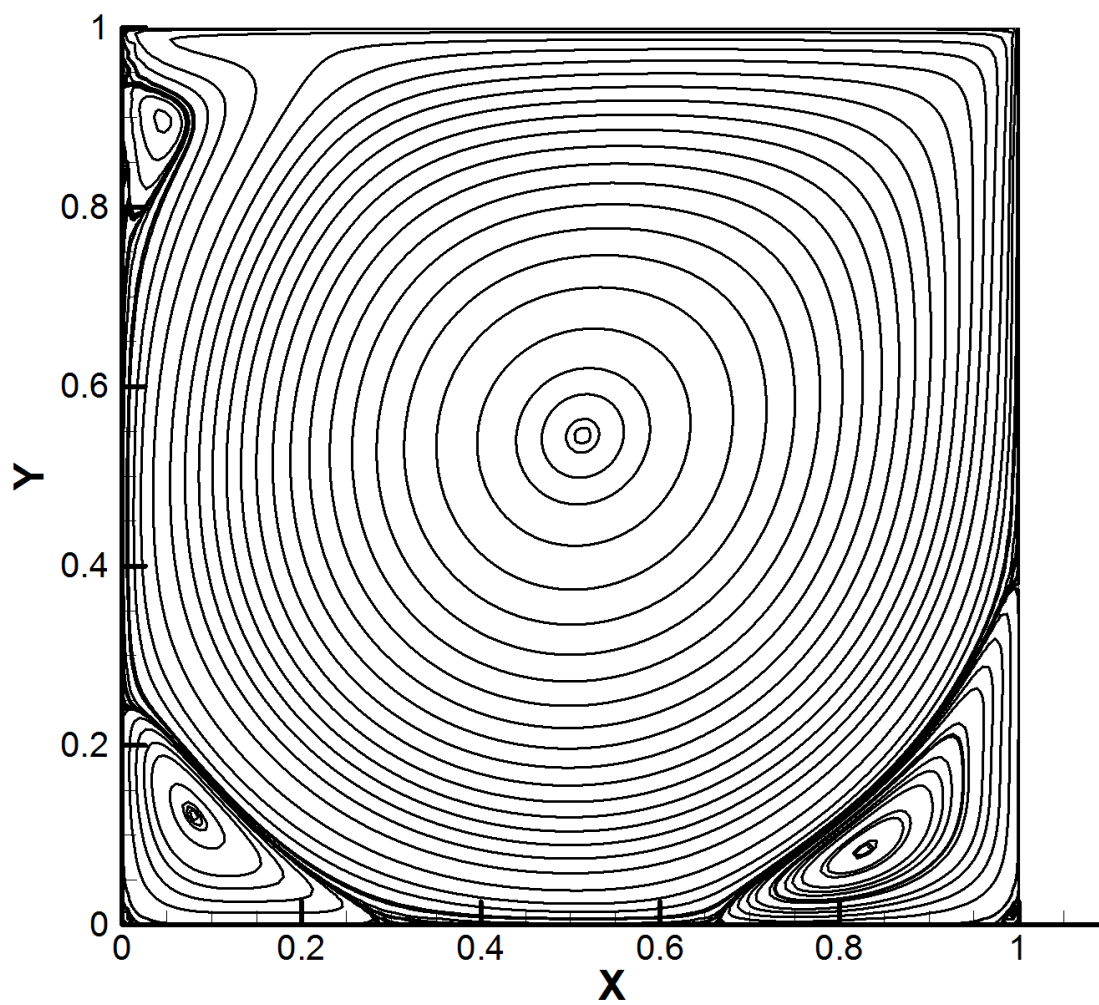
Vortex	Property	Ghia et al.	Our results
Primary	Location, x ,y	0.5547, 0.6055	0.5519, 0.6048
T1	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-
BL1	Location, x ,y	0.0508, 0.0469	-
	H _L	0.1273	0.1206
	V _L	0.1081	0.1051
BR1	Location, x ,y	0.8906, 0.1250	0.8858, 0.1234
	H _L	0.2617	0.2617
	V _L	0.3203	0.3192
BL2	Location, x ,y	0.0039, 0.0039	0.0030, 0.0039
	H _L	0.0039	0.0030
	V _L	0.0039	0.0039
BR2	Location, x ,y	0.9922, 0.0078	0.9971, 0.0041
	H _L	0.0156	0.0098
	V _L	0.0156	0.0098
BR3	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-



Re=1000

Re=1000

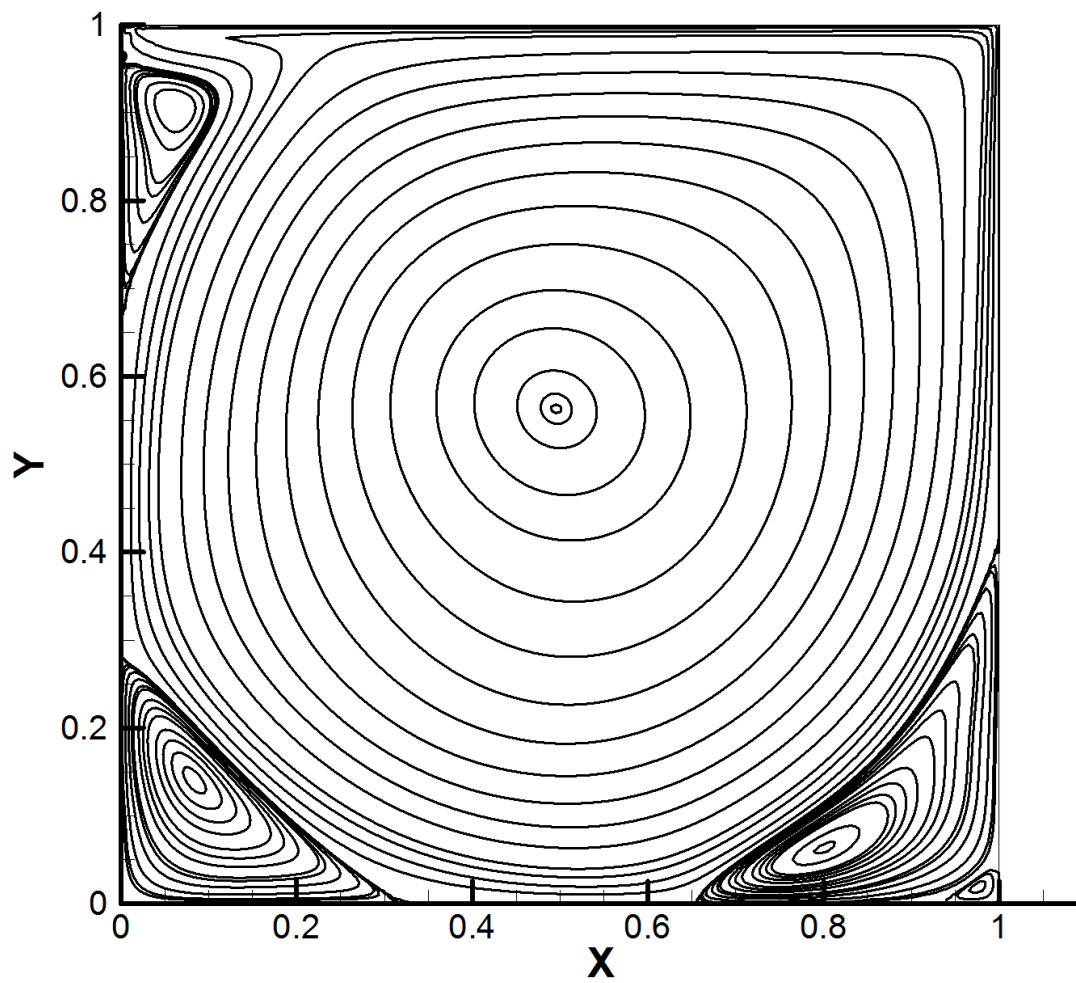
Vortex	Property	Ghia et al.	Our results
Primary	Location, x ,y	0.5313, 0.5625	0.5314, 0.5659
T1	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-
BL1	Location, x ,y	0.0859, 0.0781	0.0827, 0.0783
	H _L	0.2188	0.2117
	V _L	0.1680	0.1698
BR1	Location, x ,y	0.8594, 0.1094	0.8653, 0.1091
	H _L	0.3034	0.3007
	V _L	0.3536	0.3489
BL2	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-
BR2	Location, x ,y	0.9922, 0.0078	0.9909, 0.0098
	H _L	0.0078	0.0098
	V _L	0.0078	0.0091
BR3	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-



Re=3200

Re=3200

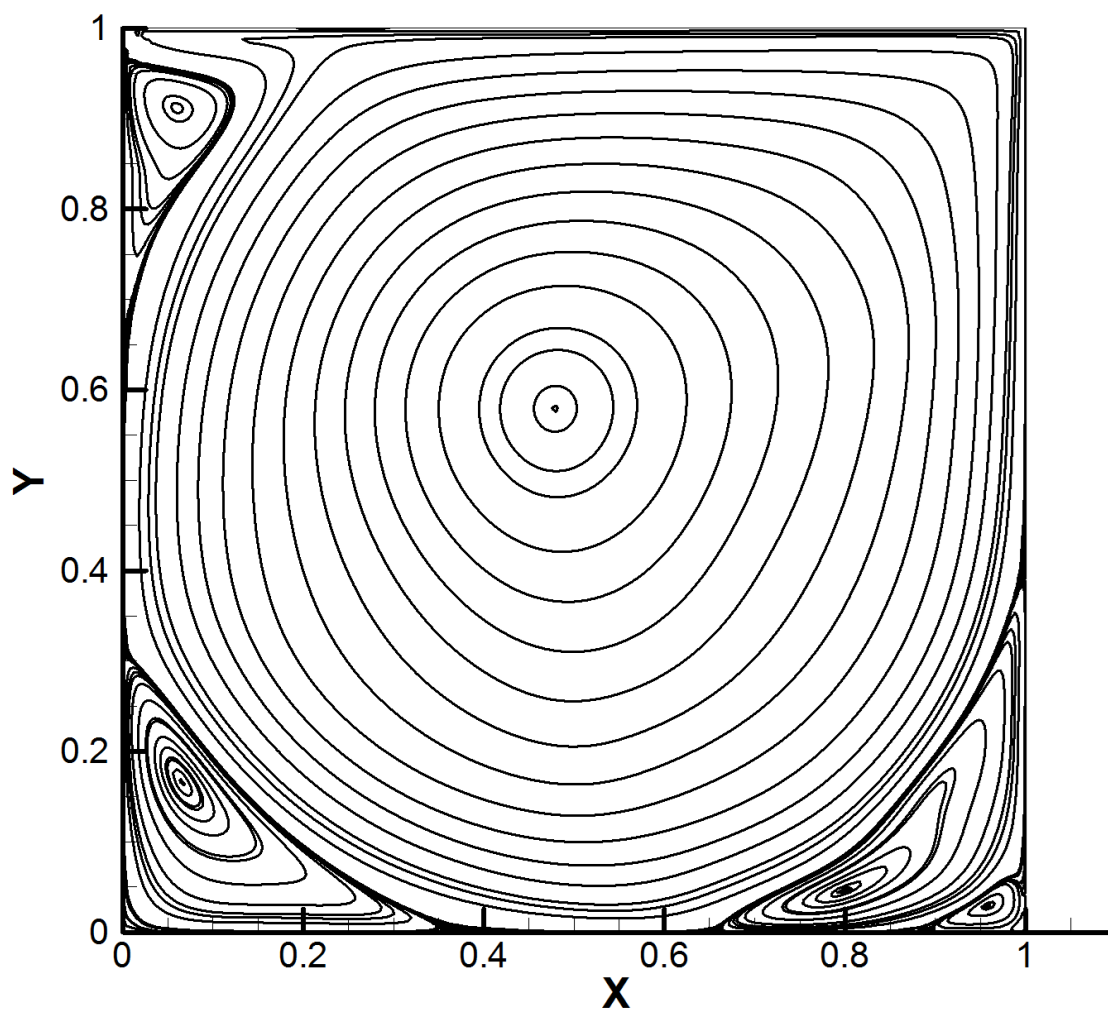
Vortex	Property	Ghia et al.	Our results
Primary	Location, x ,y	0.5165, 0.5469	0.5150, 0.5454
T1	Location, x ,y	0.0547, 0.8984	0.0520, 0.8957
	H _L	0.0859	0.0827
	V _L	0.2057	0.1946
BL1	Location, x ,y	0.0859, 0.1094	0.08448, 0.1152
	H _L	0.2844	0.2875
	V _L	0.2305	0.2342
BR1	Location, x ,y	0.8125, 0.0859	0.8243,0.0824
	H _L	0.3406	0.3392
	V _L	0.4102	0.3936
BL2	Location, x ,y	0.0078, 0.0078	0.0073, 0.0080
	H _L	0.0078	0.0073
	V _L	0.0078	0.0080
BR2	Location, x ,y	0.9844, 0.0078	0.9935, 0.0120
	H _L	0.0254	0.0265
	V _L	0.0234	0.0238
BR3	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-



Re=5000

Re=5000

Vortex	Property	Ghia et al.	Our results
Primary	Location, x ,y	0.5117, 0.5352	0.4965, 0.5577
T1	Location, x ,y	0.0625, 0.9102	0.0622, 0.9060
	H _L	0.1211	0.1135
	V _L	0.2693	0.2602
BL1	Location, x ,y	0.0703, 0.1367	0.0786,0.1398
	H _L	0.3184	0.3122
	V _L	0.2643	0.2750
BR1	Location, x ,y	0.8086, 0.0742	0.8018, 0.0701
	H _L	0.3565	0.3457
	V _L	0.4180	0.4000
BL2	Location, x ,y	0.0117, 0.0078	0.0131, 0.0087
	H _L	0.0156	0.0169
	V _L	0.0163	0.0172
BR2	Location, x ,y	0.9805, 0.0195	0.9800, 0.0189
	H _L	0.0528	0.0561
	V _L	0.0417	0.394
BR3	Location, x ,y	-	-
	H _L	-	-
	V _L	-	-



Re=7500

Re=7500

Vortex	Property	Ghia et al.	Our results
Primary	Location, x ,y	0.5117, 0.5322	0.4802, 0.5741
T1	Location, x ,y	0.0664, 0.9141	0.0643, 0.9121
	H _L	0.1445	0.1257
	V _L	0.2993	0.2827
BL1	Location, x ,y	0.0645, 0.1504	0.06842, 0.1664
	H _L	0.3339	0.3490
	V _L	0.2793	0.2975
BR1	Location, x ,y	0.7813, 0.0625	0.7956, 0.0537
	H _L	0.3779	0.3478
	V _L	0.4375	0.4327
BL2	Location, x ,y	0.0117, 0.0117	0.0099, 0.0099
	H _L	0.0234	0.0263
	V _L	0.0254	0.0256
BR2	Location, x ,y	0.9492, 0.0430	0.9553, 0.03101
	H _L	0.1270	0.1112
	V _L	0.0938	0.1000
BR3	Location, x ,y	0.9961, 0.0039	0.9967, 0.0033
	H _L	0.0039	0.0033
	V _L	0.0039	0.0033

در بخش‌های بعدی سائروتین‌ها و متن اصلی برنامه بررسی می‌شوند.

۳- متن اصلی برنامه Main

متن اصلی برنامه در واقع دارای دو وظیفه مهم به شرح زیر است:

۱- گرفتن ابعاد شبکه از کاربر (n, m) و تعیین ابعاد متغیرهای ماتریسی (Allucate) بکار رفته در تمام سابروتین‌ها

۲- کنترل فرایند حل از طریق فراخوانی (Call) سابروتین‌ها، سنجش شرایط همگرایی و نمایش گزارشاتی از شرایط محاسبات

در این قسمت به تعریف متغیرهای کنترل فرایند حل اکتفا نموده و سایر متغیرها در سابروتین مربوطه به تفصیل بررسی خواهند شد. پس از آن به صورت اجمالی کارایی و نحوه عملکرد سابروتین‌ها را توضیح داده خواهد شد.

در جدول ۳-۱ متغیرهای کنترل فرایند حل معرفی شده‌اند.

جدول ۱-۳: تعریف متغیرهای کنترل فرایند حل

متغیر داخل برنامه	تعریف متغیر	نوع متغیر
iTStep	شمارنده گام زمانی	عدد طبیعی
mstep	حداکثر گام زمانی است که در کد حاضر در ۱۰۰۰۰۰۰ ثابت شده است و در موارد خاص مثلاً در استفاده از شبکه‌های بسیار ریز یا پدیده‌های با فیزیک کند می‌توان آن را افزایش داد و هیچگاه نیازی به کاهش آن نیست.	عدد طبیعی
StepCR	گام زمانی بحرانی است و در واقع پس از هر تعداد گام زمانی بحرانی سابروتین خروجی فراخوانی می‌شود. این مقدار بحرانی هرچه بزرگتر باشد، زمان کمتری برای محاسبات خروجی و نمایش گزارشات حین اجرای برنامه صرف می‌شود. این مقدار در اینجا برابر ۵۰ است.	عدد طبیعی
ResF	باقیمانده جریان (Residual) است که معیاری برای همگرایی حوزه جریان است.	عدد حقیقی
ResConvergeF	حداقل باقیمانده جریان برای همگرایی	عدد حقیقی

تمام سابروتین‌های کد حاضر که در برنامه اصلی فراخوانی می‌شوند در جدول ۲-۳ به اختصار توضیح داده شده‌اند.

جدول ۳-۲: سابروتین‌های فراخوانی شده در متن اصلی برنامه

سابروتین	شرح وظایف
Pre_Solution	این سابروتین پارامترهای فیزیکی ورودی را گرفته و پس از تحلیل آنها پارامترهای محاسباتی را مقدار دهی اولیه می‌کند. ضمناً روابط نانو در این سابروتین اعمال می‌شود.
Fluid_Flow	این سابروتین حوزه جریان را حل نموده و سرعت‌های افقی و عمودی را بدست می‌آورد.
Output	این سابروتین پارامترهای خروجی را محاسبه کرده و در فایل‌های مربوطه چاپ می‌کند.
Residual	این سابروتین باقیمانده‌های دما و جریان را جهت سنجش همگرایی حل محاسبه می‌کند.
After_Solution	در این سابروتین پس از همگرایی حل، بار دیگر سابروتین Output فراخوانی شده و گزارشات اتمام فرایند حل مسئله به نمایش در می‌آیند.

ترتیب فراخوانی توابع و کنترل فرایند حل به شرح زیر است:

Call Pre_Solution

Do iTStep=1,mstep

Call Fluid_Flow(n,m,Rho,u,v,Thow,f,U0)

If(iTStep-StepCR*(iTStep/StepCR)<0.01)Then

Call Output(n,m,U0,Rho,u,v)

Print*,'Step==',iTStep/StepCR

Print*,'Residual of Flow==',ResF

End If

Call Residual(n,m,ResF,u,v,UOld,VOld)

If(ResF<ResConvergF)Exit

End Do Call After_Solution

در خطوط برنامه بالا چهار قسمت که زیر آنها خط کشیده شده است، نیاز به توضیح بیشتر دارد که در جدول زیر به آن پرداخته شده است.

جدول ۳-۴: توضیح خطوط نکته‌دار برنامه

خط برنامه	توضیح
$\text{If}(\text{iTStep}-\text{StepCR}*(\text{iTStep}/\text{StepCR})<0.01)$ <p>Then</p>	<p>با توجه به اینکه iTSte و StepCR هر دو عدد طبیعی هستند، عبارت iTStep/StepCR نیز یک عدد طبیعی است و در نتیجه در صورت تقسیم‌پذیر بودن گام زمانی بر گام بحرانی عبارت برابر صفر و کوچکتر از هر عدد گویای کوچکتر از یک (۰/۰۱) می‌باشد.</p>
$\text{Step}=='\text{iTStep}/\text{StepCR}'$	<p>Step چاپ شده در این قسمت در واقع گام زمانی نیست و منظور تعداد دفعات فراخوانی سابروتین Output است.</p>
$\text{If}(\text{ResF}<\text{ResConvergF})\text{Exit}$	<p>این خط برنامه در واقع شرط همگرایی برنامه را می‌سنجد و اگر مقدار باقیمانده جریان از مقدار همگرایی کوچکتر شود اجرای حلقه اصلی برنامه متوقف می‌شود.</p>

در بخش‌های بعدی باقی سابروتین‌ها شرح داده می‌شوند.

۴- سابروتین Pre_Solution

سابروتین Pre_Solution در واقع وظیفه آماده کردن پیش نیازهای شروع فرایند حل مسئله را دارند. این وظایف به شرح زیر هستند:

۱- خواندن تمام ورودی‌های فیزیکی مسئله

۲- تحلیل پارامترها و بدست آوردن سایر پارامترها اعم از پارامترهای فیزیکی و عددی مربوط به روش شبکه بولتزمن از پارامترهای ورودی

۳- اعمال روابط نانوسیال و تغییر پارامترهای مربوطه

۴- مقداردهی اولیه پارامترهای ماتریسی

وظیفه اول از لحاظ کد نویسی پیچیدگی خاصی ندارد و از توضیح آن برای پرهیز از زیاده‌گویی اجتناب می‌شود.

وظیفه دوم شامل خطوط برنامه‌ای است که پیرو برخی روابط فیزیکی و عددی در روش شبکه بولتزمن هستند. این خطوط و روابط متناظر در جدول ۴-۱ به تفصیل بررسی شده‌اند.

جدول ۴-۱: خطوط مربوط به تحلیل پارمترها و روابط مربوطه

خط برنامه	توضیح
Rho0=5.	ρ_0 مقدار اولیه چگالی است و با توجه به اینکه در جواب مسئله تأثیر ندارد برابر با ۵ قرار داده می‌شود.
Uin=0.1	سرعت ورودی باید به گونه‌ای تعریف شود که ماکزیمم سرعت بیشتر از ۰/۱ نشود. در اینجا روی ۰/۱ ثابت شده است.
Visco=Uin*float(m)/Re	$\nu = \frac{V_0 H}{Re}$
Thow=3.*Visco+.5	در روش شبکه بولتزمن با مدل سرعت D2Q9 رابطه ویسکوزیته سینماتیکی و زمان آرامش جریان (Relaxation time) به صورت زیر است: $\tau = 3.0\nu + 0.5$

وظیفه دوم مقداردهی اولیه ماتریس‌ها است که به وضوح در انتهای سابروتین دیده می‌شود و نیازی به توضیح بیشتر احساس نمی‌شود.

۵- سابروتین Fluid_Flow

این سابروتین که وظیفه محاسبه سرعت و پارامترهای جریانی را دارد، مطابق روش شبکه بولتزمن از چهار بخش زیر تشکیل شده است:

۱- مرحله برخورد (Collision):

در این مرحله تابع توزیع چگالی از روی سرعت‌ها، چگالی و نیروهای خارجی در هر نقطه و جهت سرعتی محاسبه می‌شود.

۲- مرحله انتشار (Streaming):

در این مرحله تابع توزیع چگالی هر نقطه در جهت‌های مشخص شبکه و متناسب با آن منتشر شده و بر نقاط کناری اثر خود را منتقل می‌کند.

۳- شرط مرزی:

در این مرحله شرط مرزی دیواره‌ها بر گره‌های مرزی اعمال می‌شود.

۳- محاسبه سرعت‌ها و چگالی:

در این مرحله با کمک روابط بین دیدگاهی موزسکوپیک و ماکروسکوپیک، چگالی و سرعت‌های افقی و عمودی از تابع توزیع چگالی دیدگاه موزسکوپیک روش شبکه بولتزمن محاسبه می‌شود.

در ادامه پس از معرفی برخی از پارامترهای روش شبکه بولتزمن تک تک مراحل فوق با توجه به خطوط برنامه و روابط مربوطه توضیح داده خواهد شد.

در جدول ۵-۱ پارامترهای روش شبکه بولتزمن توضیح داده شده‌اند.

جدول ۵-۱: تعریف متغیرهای روش شبکه بولتزمن

متغیر داخل فایل	تعریف متغیر	نوع متغیر
b	تعداد جهت‌های سرعت است که در مدل سرعت D2Q9 برابر ۹ است ولی با توجه به اینکه در کد حاضر جهت سرعت‌ها از صفر شمرده می‌شود، برابر ۸ است.	عدد طبیعی
w	ω_i ضریب وزنی جهت‌های سرعت شبکه بوده و در جهت‌های i از صفر تا ۸ و بر پایه مدل سرعت D2Q9 مقادیر زیر را دارد:	عدد طبیعی
ey و ex	به ترتیب سرعت افقی و عمودی شبکه هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:	عدد طبیعی
C_s	سرعت صوت در شبکه است که در مدل سرعت D2Q9 برابر $1/\sqrt{3}$ می‌باشد.	
Δx و Δt	به ترتیب تغییر زمان و تغییر مکان هستند و برابر یک فرض می‌شوند.	
f	تابع توزیع چگالی است که در مرحله برخورد توضیح داده خواهد شد.	عدد حقیقی
freq	تابع توزیع تعادلی چگالی است که در مرحله برخورد توضیح داده خواهد شد.	عدد حقیقی

گفته شد که هدف مرحله برخورد محاسبه تابع توزیع چگالی است ولی لازمه آن محاسبه تابع توزیع تعادلی چگالی است. روابط و خطوط برنامه مربوط به محاسبه این دو متغیر در جدول ۵-۲ آورده شده است.

جدول ۵-۲: خطوط برنامه مربوط به محاسبه تابع توزیع و تابع توزیع تعادلی چگالی در مرحله برخورد

رابطه	هدف	برنامه
$f_i^{eq} = \omega_i \rho \left[1 + \frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{Cs^2} + \frac{(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2}{2Cs^4} - \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}{2Cs^2} \right]$ $f_i(x + \mathbf{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{1}{\tau} \left[f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t) \right]$	محاسبه تابع توزیع تعادلی و محاسبه تابع توزیع	<pre> Do i=0,n Do j=0,m t1=u(i,j)*u(i,j)+v(i,j)*v(i,j) Do k=0,b t2=u(i,j)*ex(k)+v(i,j)*ey(k) feq(k,i,j)=Rho(i,j)*w(k)*(1.+3.*t2+4.5*t2*t2-1.5*t1) f(k,i,j)=f(k,i,j)-(f(k,i,j)-feq(k,i,j))/Thow End Do End Do End Do </pre>

مرحله بعدی انتشار است که همانطور که گفته شده است، توابع توزیع را در جهت‌های مختلف از شبکه‌ای به شبکه دیگر منتقل می‌کند. کد مربوط به این قسمت به صورت زیر می‌باشد. گفتنی است که روش کد نویسی این قسمت انواع مختلفی دارد و در اینجا از ساده‌ترین شکل آن که در واقع ابتکار نگارنده می‌باشد، استفاده شده است. اینطور که به نظر می‌رسد این اینگونه نوشتن مرحله انتشار بهتر از دیگر روش‌ها مفهوم انتشار را منتقل می‌کند.

$$f(1,1:n,0:m) = f(1,0:n-1,0:m)$$

$$f(2,0:n,1:m) = f(2,0:n,0:m-1)$$

$$f(3,0:n-1,0:m) = f(3,1:n,0:m)$$

$$f(4,0:n,0:m-1) = f(4,0:n,1:m)$$

$$f(5,1:n,1:m) = f(5,0:n-1,0:m-1)$$

$$f(6,0:n-1,1:m) = f(6,1:n,0:m-1)$$

$$f(7,0:n-1,0:m-1) = f(7,1:n,1:m)$$

$$f(8,1:n,0:m-1) = f(8,0:n-1,1:m)$$

مرحله بعدی مربوط به اعمال شرط مرزی است که در اینجا برای دیواره‌های ثابت از شرط مرزی بازگشت به عقب و برای دیواره متحرک از شرط مرزی سرعت معلوم استفاده شده است. کد و روابط مربوط به اعمال شرط مرزی در جدول ۳-۵ آورده شده است.

جدول ۵-۳: دیواره و شرط مرزی اعمال شده برای آن در کد حاضر

توضیح	کد اعمال شرط مرزی	دیواره
برای شرط مرزی بازگشت به عقب، در واقع تابع توزیع در جهت مجهول برابر با مقدار تابع توزیع در جهت مخالف قرار داده می‌شود.	$f(2,0:n,0)=f(4,0:n,0)$ $f(5,0:n,0)=f(7,0:n,0)$ $f(6,0:n,0)=f(8,0:n,0)$	دیواره پایینی
برای شرط مرزی بازگشت به عقب، در واقع تابع توزیع در جهت مجهول برابر با مقدار تابع توزیع در جهت مخالف قرار داده می‌شود.	$f(3,n,0:m)=f(1,n,0:m)$ $f(7,n,0:m)=f(5,n,0:m)$ $f(6,n,0:m)=f(8,n,0:m)$	دیواره سمت راست
برای شرط مرزی بازگشت به عقب، در واقع تابع توزیع در جهت مجهول برابر با مقدار تابع توزیع در جهت مخالف قرار داده می‌شود.	$f(1,0,0:m)=f(3,0,0:m)$ $f(5,0,0:m)=f(7,0,0:m)$ $f(8,0,0:m)=f(6,0,0:m)$	دیواره سمت چپ
شرط مرزی سرعت معلوم در دیواره بالایی اینگونه اعمال می‌شود.	Do i=1,n-1 $R_{how}=f(0,i,m)+f(1,i,m)+f(3,i,m)$ $+2.*(f(2,i,m)+f(6,i,m)+f(5,i,m))$ $f(4,i,m)=f(2,i,m)$ $f(7,i,m)=f(5,i,m)-R_{how}*U_0/6.$ $f(8,i,m)=f(6,i,m)+R_{how}*U_0/6.$ End Do	دیواره بالایی با سرعت معلوم

مرحله نهایی سابروتین Fluid_Flow بدست آوردن سرعت‌ها و چگالی ماکروسکوپی از توابع توزیع است که کد و روابط مربوطه در جدول ۵-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۵: خطوط برنامه مربوط به محاسبه سرعت و چگالی

رابطه	خطوط برنامه
$\rho = \sum_{i=0}^{b-1} f_i$	Do i=0,n Do j=0,m rho(i,j)=sum(f(:,i,j)) End Do End Do Do j=1,m-1 rho(0,j)=(f(0,0,j)+f(2,0,j)+f(4,0,j)+ 2.*(f(3,0,j)+f(6,0,j)+f(7,0,j)))/(1.-Uin) End Do
$\rho u = \sum_{i=0}^{b-1} \mathbf{e}_i f_i$	Do i=1,n Do j=1,m-1 u(i,j)=sum(f(:,i,j)*ex(:))/rho(i,j) v(i,j)=sum(f(:,i,j)*ey(:))/rho(i,j) End Do End Do
این خط برنامه برای افزایش دقت شرط مرزی خروجی استفاده می‌شود.	Do j=1,m-1 v(n,j)=0. End Do

سابروتین قبلی بخش در Residual محاسبه همگرایی سنجش برای را جریان و دما باقیمانده مقادیر که

می‌کند، بررسی خواهد شد.

۶- سابروتین Residual

این سابروتین در حقیقت معیار همگرایی را برای سنجش در متن اصلی محاسبه می‌کند. گفتی است که معیارهای متفاوتی مانند برابر شدن ناسلت روی دو دیواره سرد و گرم و... برای سنجش همگرایی پیشنهاد شده است ولی تجربه نشان داده که بهترین و سازگارترین معیار برای روش شبکه بولتزمن استفاده از معیار L_2 (norm L_2) می‌باشد. برتری این معیار و در واقع روش محاسبه باقیمانده این است که باقیمانده‌های دما و جریان و ... همگی دارای یک scale بوده و با پایا شدن جریان به سرعت کاهش می‌یابند و بدین ترتیب ضمن اینکه از محاسبات اضافی پرهیز شده، احتمال رخ دادن همگرایی کاذب که ناشی از برابر نبودن scale باقیمانده‌هاست وجود ندارد.

در جدول ۱-۶ کد و رابطه مربوط به محاسبه باقیمانده جریان و دما آورده شده است.

جدول ۱-۶: خطوط برنامه مربوط به محاسبه باقیمانده‌های جریان و دما

رابطه	خطوط برنامه
$\text{Residual of flow} = \frac{\sum \ u(x, t + \Delta t) - u(x, t)\ }{\sum \ u(x, t)\ }$	<pre> Do i=0,n Do j=0,m Su=Su+U(i,j)**2+V(i,j)**2 ResF=ResF+(U(i,j)-UOld(i,j))**2+(V(i,j)-VOld(i,j))**2 UOld(i,j)=U(i,j) VOld(i,j)=V(i,j) End Do End Do ResF=Sqrt(ResF)/Sqrt(Su) </pre>

در بخش بعدی سابروتین Output که کار محاسبه و چاپ خروجی برنامه را در فایل‌های خروجی دارد، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۷- سابروتین Output

وظیفه این سابروتین چاپ کانتورهای خط جریان و سرعت‌های افقی و عمودی و خط جریان در فایل Result.dat مطابق با فرمت برنامه Tecplot می‌باشد.

خطوط برنامه و نکات مهم بخش‌های بالا در جدول ۸-۱ آورده شده است.

جدول ۷-۱: خطوط برنامه و نکات مهم مربوط به بخشهای مختلف سابروتین Output

بخش	خطوط برنامه	نکات مهم
۱	<pre> Strf(0,:)=0. Do i=1,n Rhoav=0.5*(Rho(i-1,0)+Rho(i,0)) Strf(i,0)=Strf(i-1,0)-Rhoav*0.5*(v(i-1,0)+v(i,0)) Do j=1,m Rhom=0.5*(Rho(i,j)+Rho(i,j-1)) Strf(i,j)=Strf(i,j-1)+Rhom*0.5*(u(i,j-1)+u(i,j)) End Do End Do </pre>	محاسبه کانتور خطوط جریان عیناً از کتب مرجع روش شبکه بولتزمن برداشته شده و توضیح خاصی ندارد.
۲	<pre> Open(20,file='Result.dat') Write(20,*)'VARIABLES =X,Y,U,V,P,Stream' Write(20,*)"ZONE ","I=",n+1,"J=",m+1 Do j=0,m Do i=0,n Write(20,)float(i)/float(m),float(j)/float(m),u(i,j)/VScale,v(i,j)/VScale,Rho(i,j)/.3,Th(i,j),Strf(i,j) End Do End Do Close(20) </pre>	طبق فرمت نرم افزار Tecplot اگر خط سوم با I شروع شود، خط چهارم حتماً باید با J شروع شود و بالعکس.

۸- سابروتین After_Solution

پس از اتمام فرایند حل مسئله، سابروتین After_Solution بار دیگر سابروتین Output را فراخوانی نموده و گزارشات اتمام حل را به نمایش در می آورد.

- [1] A. Mohamad, Lattice Boltzmann Method: Springer, 2011 .
- [2] G. Kefayati, S. Hosseinizadeh, M. Gorji, H. Sajjadi, Lattice Boltzmann simulation of natural convection in tall enclosures using water/SiO₂ nanofluid, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No. 6, pp. 798-805, 2011 .
- [3] Y.-T. Yang, F.-H. Lai, Numerical study of flow and heat transfer characteristics of alumina-water nanofluids in a microchannel using the lattice Boltzmann method, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No. 5, pp. 607-614, 2011 .
- [4] U. Ghia, K. N. Ghia, C. Shin, High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method, Journal of computational physics, Vol. 48, No. 3, pp. 387-411, 1982.