

## فهرست مطالب

۱- چکیده	۲
۲- راهنمای کاربری	۳
نمونه اجرا	۶
نتایج نمونه اجرا شده و مقایسه با مقالات معتبر	۱۱
۳- متن اصلی برنامه Main	Error! Bookmark not defined.
۴- سابروتین Pre_Solution	Error! Bookmark not defined.
۵- سابروتین Fluid_Flow	Error! Bookmark not defined.
۶- سابروتین Fluid_Flow	Error! Bookmark not defined.
۷- سابروتین Residual	Error! Bookmark not defined.
۸- سابروتین Output	Error! Bookmark not defined.
۹- سابروتین After_Solution	Error! Bookmark not defined.
۱۰- منابع و مراجع	Error! Bookmark not defined.

## ۱- چکیده

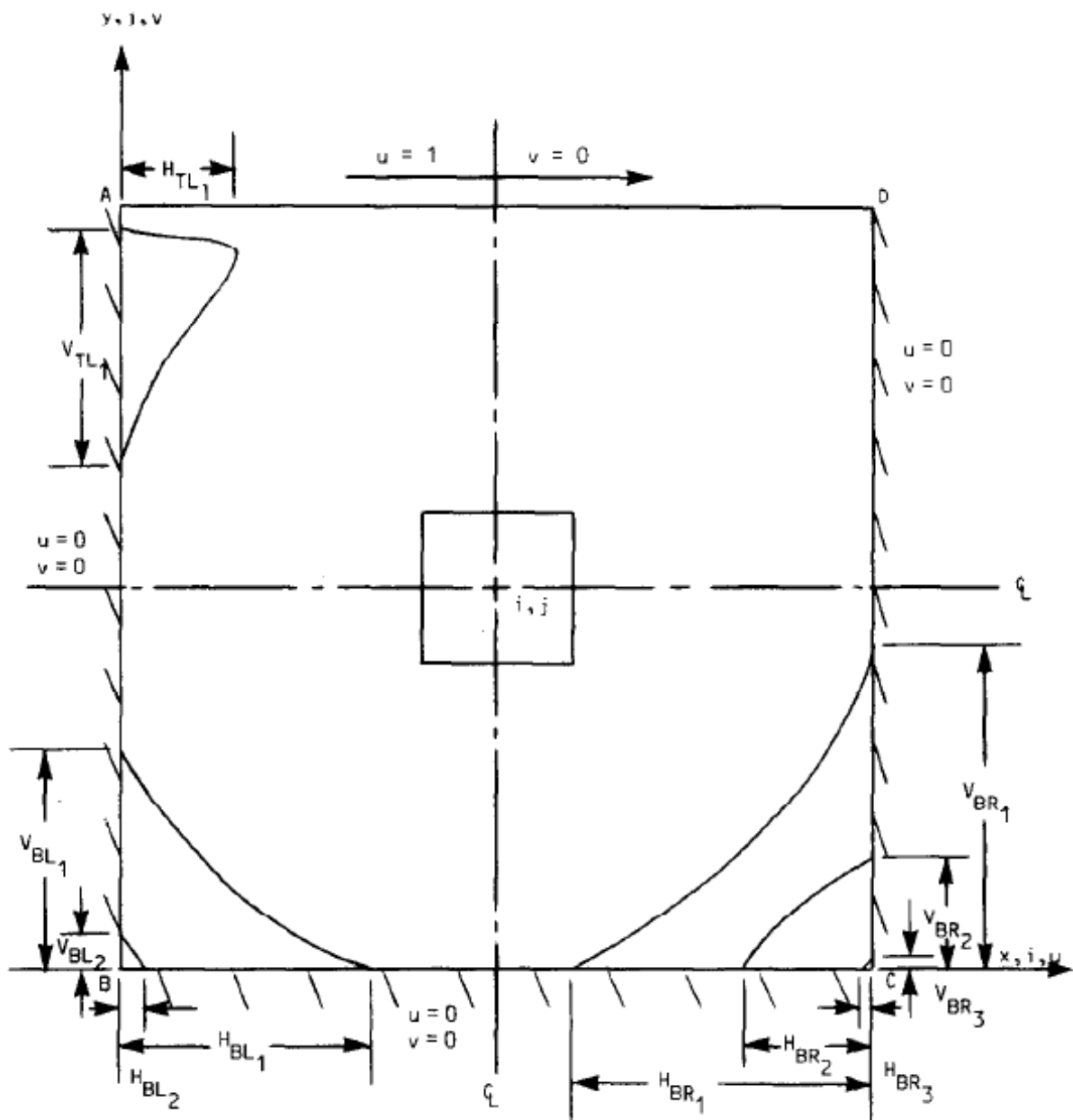
در این برنامه برای مدلسازی جریان سیال غیرنیوتنی با خاصیت توانی در محفظه‌ای با سرپوش متحرک، از روش شبکه بولتزمن با مدل سرعتی D2Q9 استفاده شده است. جهت مدلسازی رفتار سیال غیرنیوتنی از یکی از جدیدترین مدل‌ها با دقت مرتبه دو استفاده شده است. گفتنی است که برای دیواره‌های ثابت از شرط مرزی بازگشت به عقب و برای 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 نیز ایندکس توانی برابر یک قرار داده شده و با حلهای معیار معتبر مقایسه شده است.

**کلمات کلیدی:** سیال غیرنیوتنی، خاصیت توانی، روش شبکه بولتزمن، محفظه با سرپوش متحرک

## ۲- راهنمای کاربری

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 می‌خواهند نرم‌افزار را اجرا نموده و استفاده نمایند. لذا هیچ اشاره‌ای به محتوای برنامه اعم از سابروتین‌ها 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 گردابه‌هایی که ممکن است تشکیل شوند در شکل ۱-۲ قابل ملاحظه هستند. فرض بر این است که سیال غیرنیوتنی با خاصیت توانی و جریان سیال آرام و تراکم‌ناپذیر باشد.



شکل ۲-۱: هندسه مورد بررسی کد حاضر

برنامه حاضر به نحوی تهیه شده است که برای اجرای آن و وارد کردن ورودی، نیازی به ورود به متن اصلی برنامه نیست و تمام ورودی‌ها در فایل `Input_Parameters` با فرمت `Input` وارد می‌شوند. در ابتدای این بخش مقادیر فیزیکی ورودی فایل‌های مذکور معرفی می‌شوند. این مقادیر در جدول ۱-۲ تعریف شده است.

جدول ۱-۲: تعریف متغیرهای فیزیکی ورودی فایل Input\_Parameters.input

متغیر داخل فایل	تعریف متغیر
Power-Law Index( $n$ )	توان $n$ که از خواص سیال غیرنیوتنی با خاصیت غیرنیوتنی است.
Reynolds Number( $Re$ )	عدد رینولدز
Relaxation Time( $\tau$ )	زمان آرامش جریان است و بهتر است که برابر ۱ قرار داده شود.

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 بولتزمن دارد، برای اجتناب از پیچیدگی کار با کد، مناسب‌ترین آنها برای رینولدزهای متداول مربوط به جریان در ریزمجراها در کد ثابت شده اند.

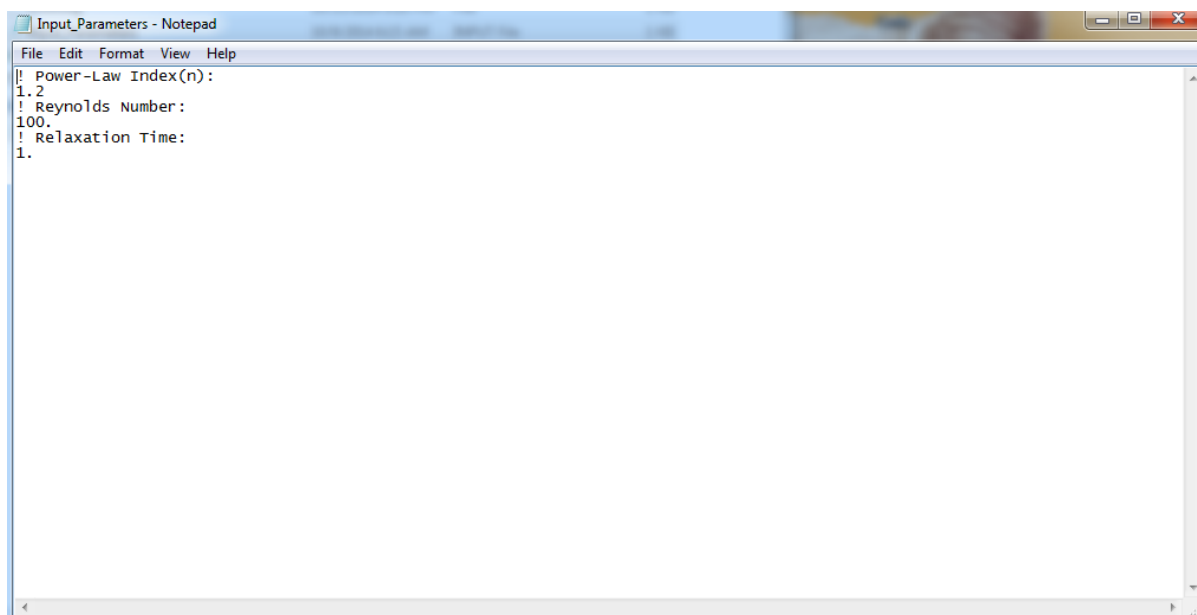
توضیحات فوق برای اجرا و استفاده از برنامه کافی است. پس از اجرا و همگرایی برنامه، فایل خروجی Result تشکیل می‌گردد. این فایل‌ها شامل کانتورهای فشار، سرعت‌ها و خطوط جریان هستند که در نمونه اجرا نمایش داده خواهد شد.

## 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 نرم افزار Notepad باز کرده و پارامترهای فیزیکی را وارد نمود.

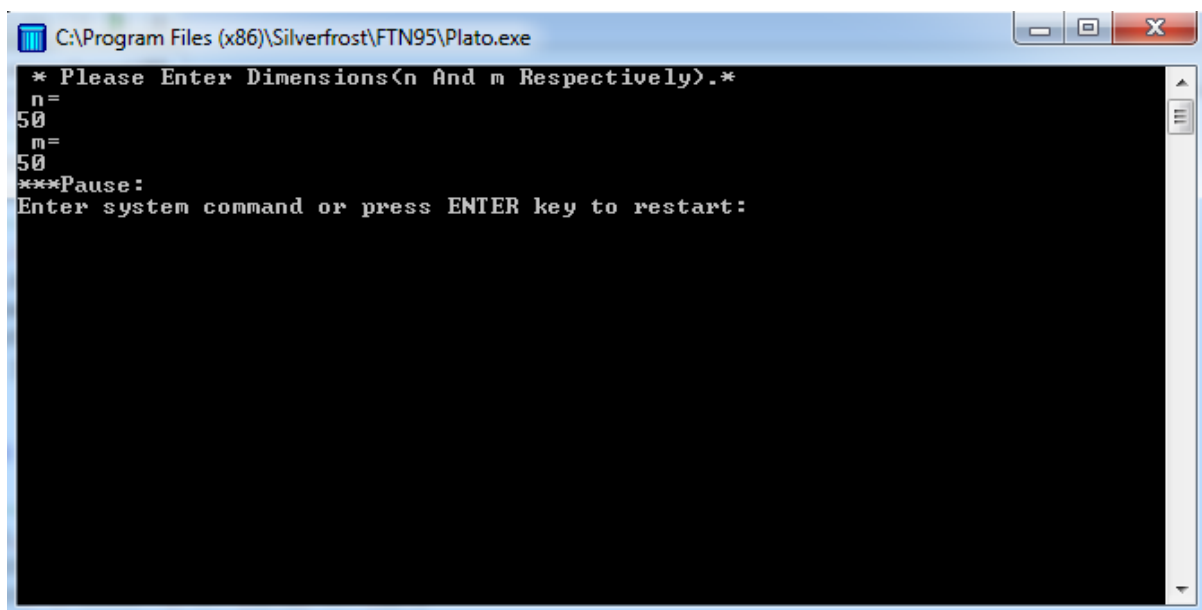


شکل ۲-۲: وارد کردن پارامترهای فیزیکی

در اینجا برای نمونه رینولدز 100 و ایندکس توانی را 1.2 و زمان آرامش جریان برابر یک قرار داده شده است.

گام دوم:

در مرحله آخر روی فایل Nunofluid In Lid 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 هرکدام 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  $50 \times 50$  انتخاب شده است.

گام سوم:

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



جدول ۲-۳: 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.

```

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 ۷۰ ثانیه به طول انجامید.

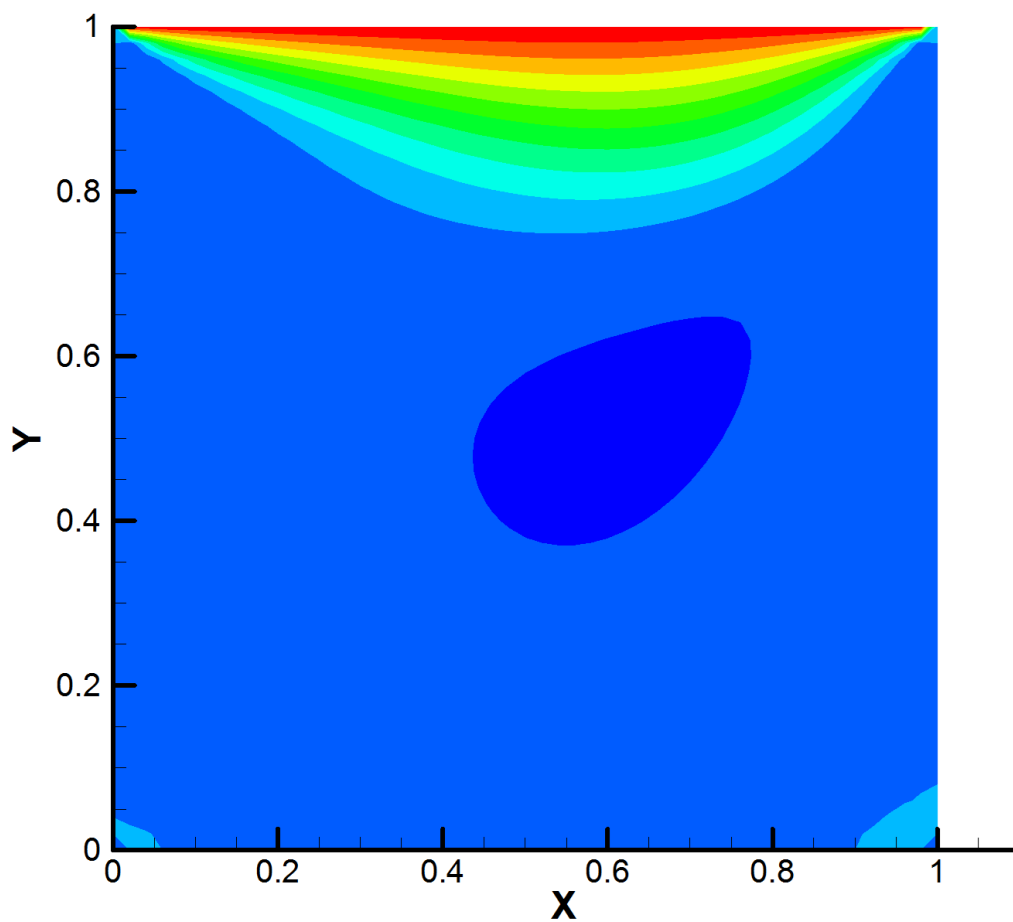
گام پنجم:

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.

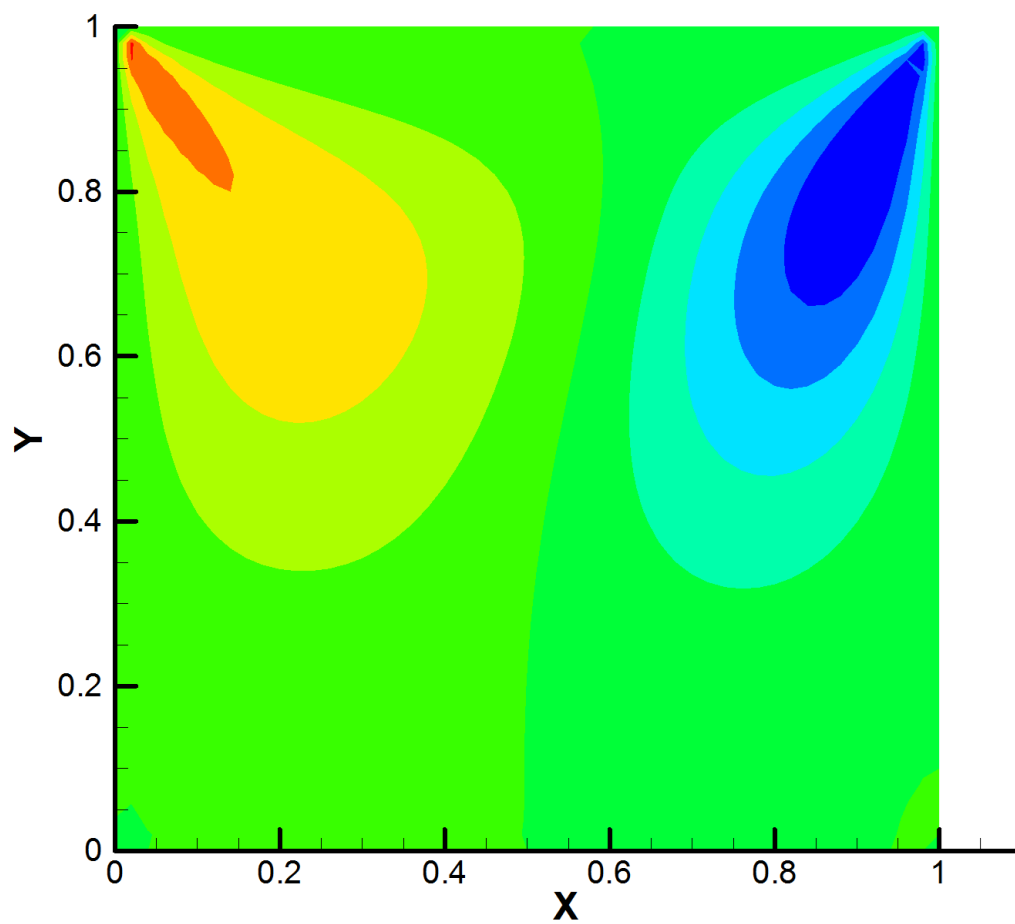
در انتهای این بخش کانتورها و نمودارهای نمونه اجرا شده نشان داده شده و محل گردابه‌ها که مناسبترین ابزار برای اعتبارسنجی کد حاضر است، با معتبرترین و مشهورترین مقاله موجود در این زمینه مقایسه خواهد شد.

### نتایج نمونه اجرا شده و مقایسه با مقالات معتبر

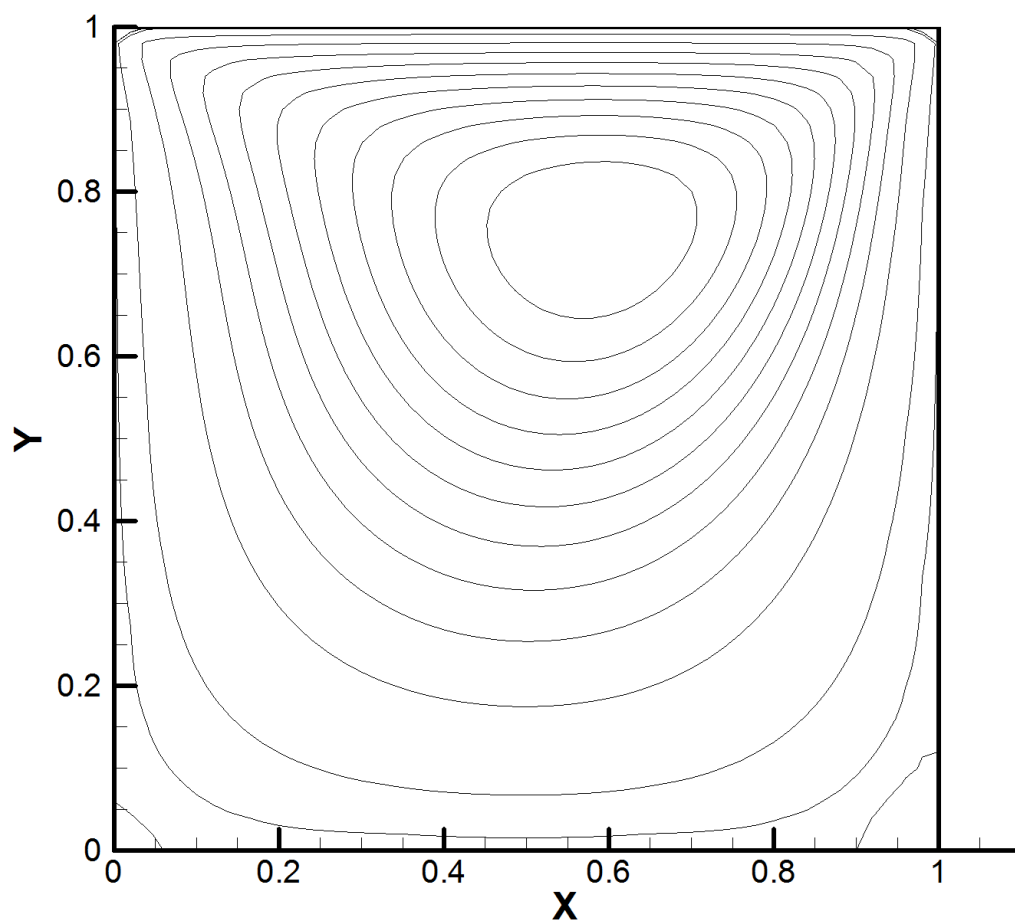
در این قسمت کانتورها و نمودارهای نمونه اجرا شده نشان داده شده و محل گردابه‌ها با معتبرترین و مشهورترین مقاله موجود در این زمینه مقایسه شده است. گفتنی است که جهت مقایسه ایندکس توانی  $n$  برابر یک قرار داده شده است.



شکل ۲-۵: کانتور سرعت افقی نمونه اجرا شده ( $Re = 100, n = 1.2$ )

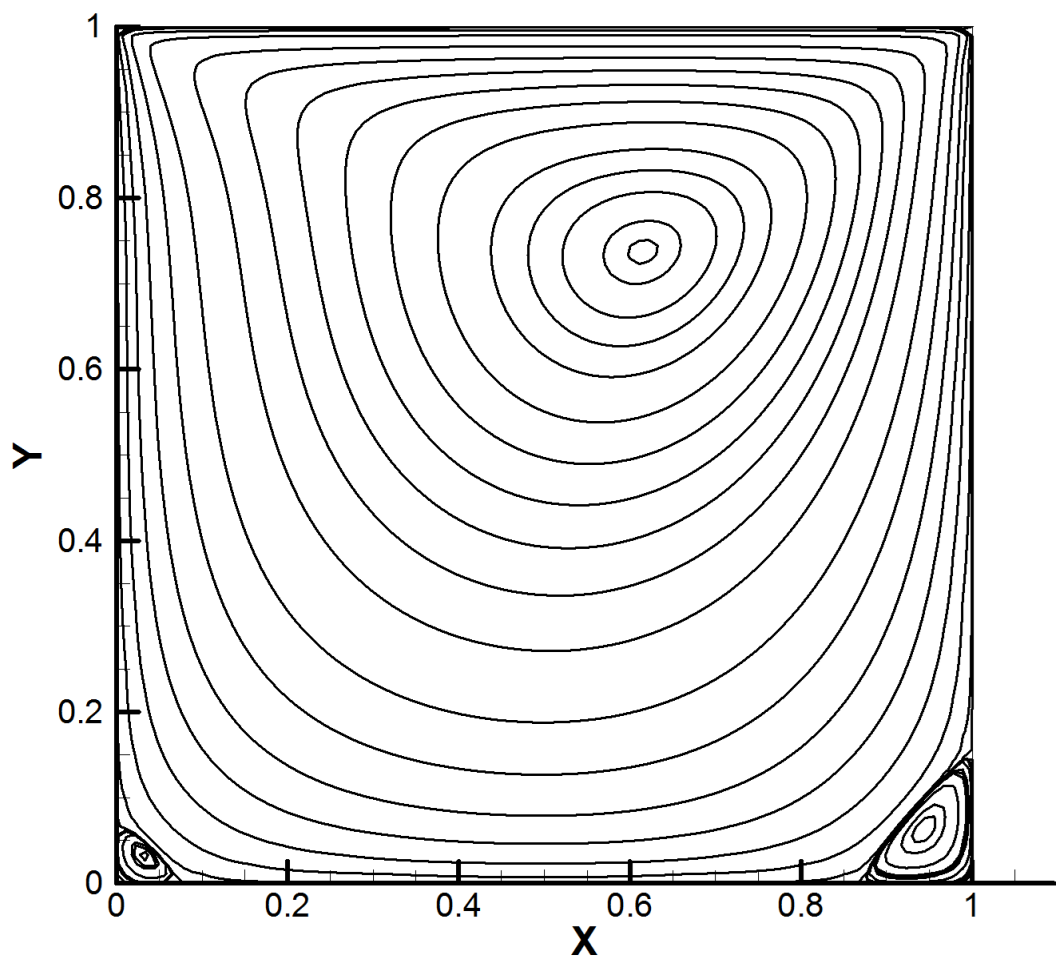


شکل ۲-۶: کانتور سرعت عمودی نمونه اجرا شده ( $Re = 100, n = 1.2$ )



شکل ۲-۷: خطوط جریان نمونه اجرا شده ( $Re = 100, n = 1.2$ )

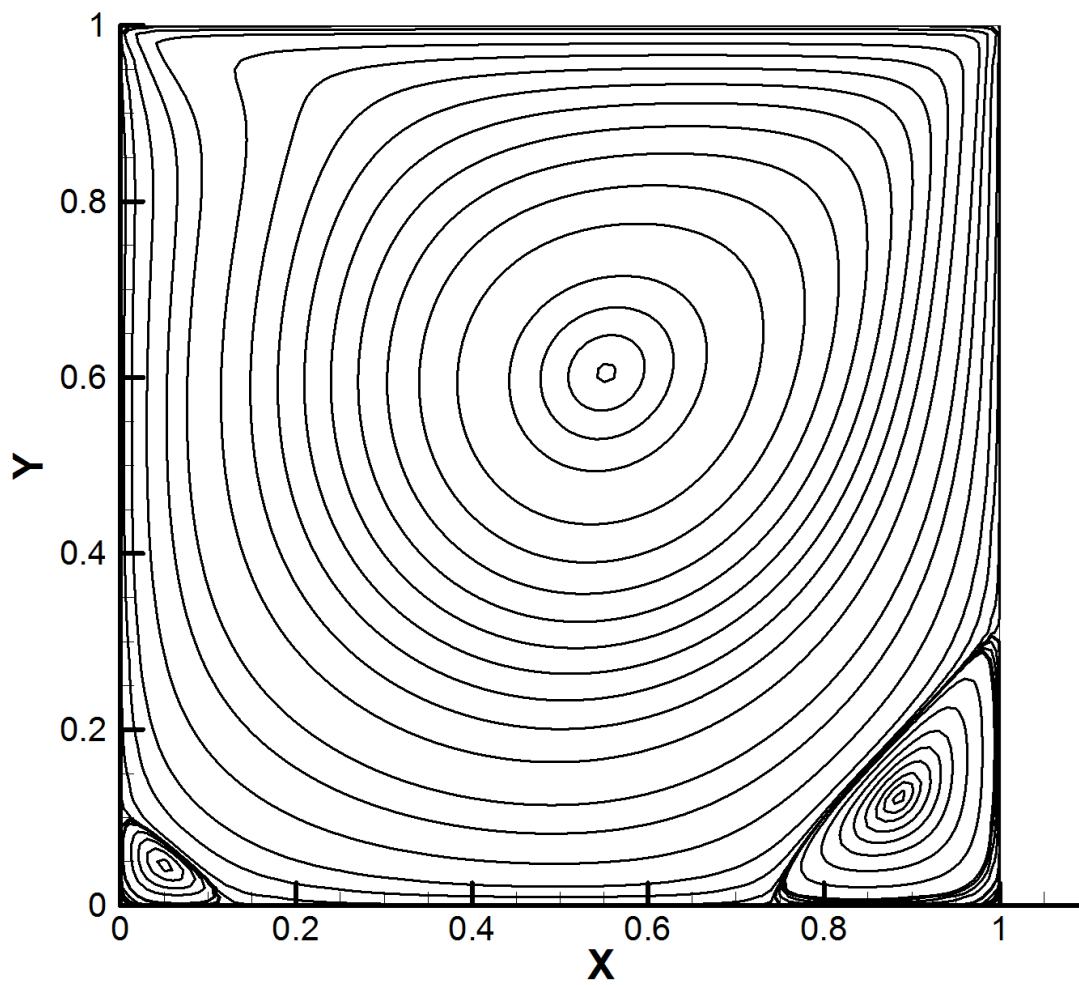
در شکل‌های زیر خطوط جریان برای رینولدزهای مختلف آورده شده و محل گردابه‌ها در جدول زیر آن با مراجع مقایسه شده است. جهت رسیدن به این نمودارها مطلوب آن است که معیار همگرایی تا حد امکان کوچک قرار داده شود و در صورت همگرایی با کلید ترکیبی **Ctrl+C** اجرا برنامه متوقف گردد.



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

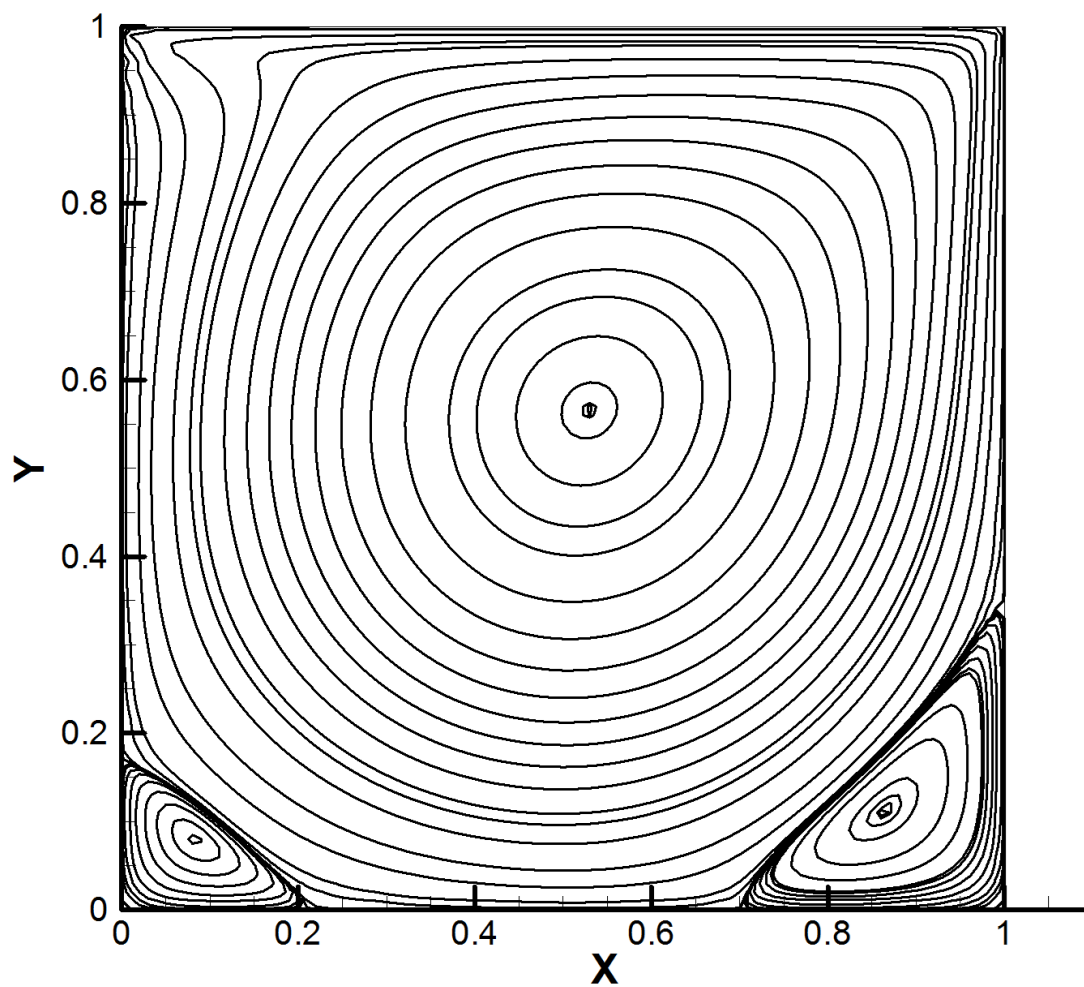


Re=400



Re=400

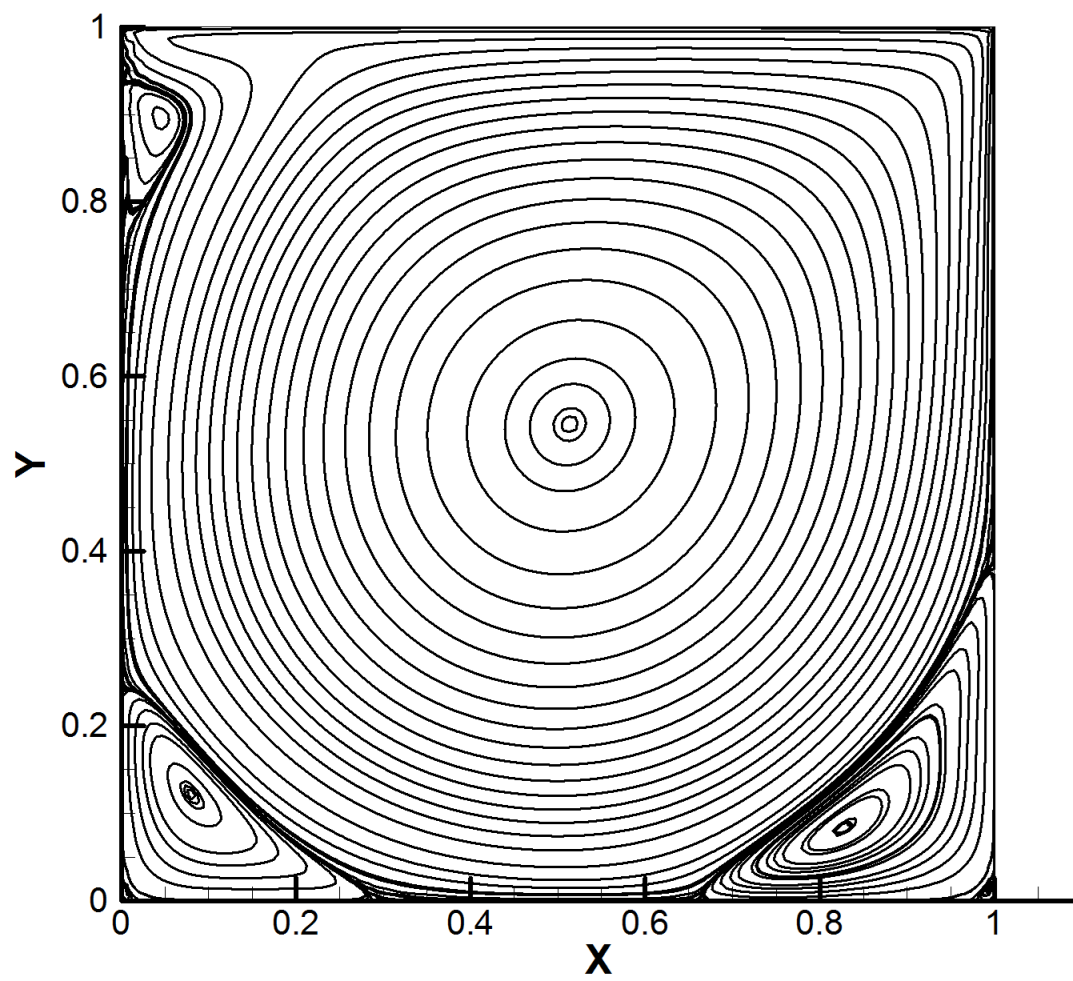
Vortex	Property	Ghia et al.	Our results
Primary	Location, x ,y	0.5547, 0.6055	0.5519, 0.6048
T1	Location, x ,y	-	-
	H <sub>L</sub>	-	-
	V <sub>L</sub>	-	-
BL1	Location, x ,y	0.0508, 0.0469	-
	H <sub>L</sub>	0.1273	0.1206
	V <sub>L</sub>	0.1081	0.1051
BR1	Location, x ,y	0.8906, 0.1250	0.8858, 0.1234
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



Re=1000

Re=1000

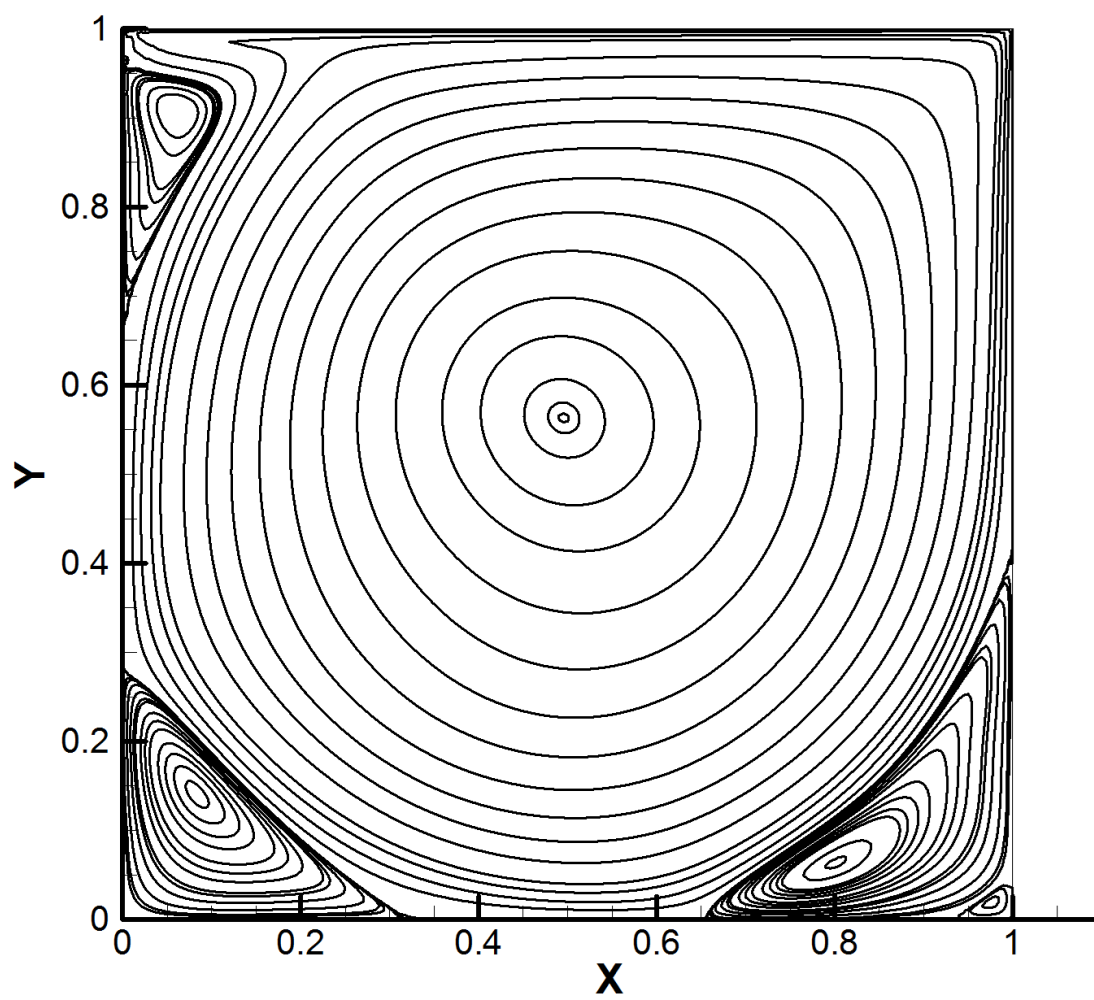
Vortex	Property	Ghia et al.	Our results
Primary	Location, x ,y	0.5313, 0.5625	0.5314, 0.5659
T1	Location, x ,y	-	-
	H <sub>L</sub>	-	-
	V <sub>L</sub>	-	-
BL1	Location, x ,y	0.0859, 0.0781	0.0827, 0.0783
	H <sub>L</sub>	0.2188	0.2117
	V <sub>L</sub>	0.1680	0.1698
BR1	Location, x ,y	0.8594, 0.1094	0.8653,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



Re=3200

Re=3200

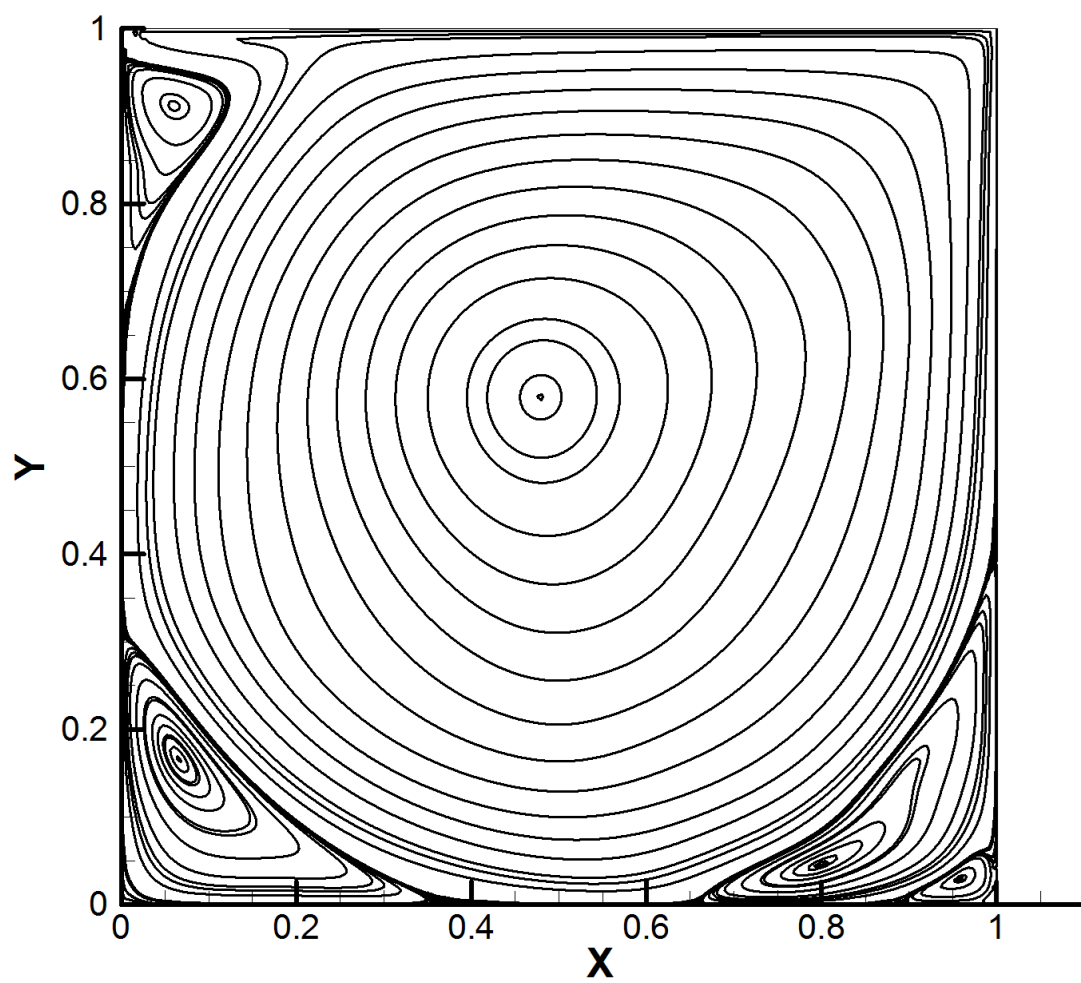
Vortex	Property	Ghia et al.	Our results
Primary	Location, x ,y	0.5165, 0.5469	0.5150, 0.5454
T1	Location, x ,y	0.0547, 0.8984	0.0520, 0.8957
	H <sub>L</sub>	0.0859	0.0827
	V <sub>L</sub>	0.2057	0.1946
BL1	Location, x ,y	0.0859, 0.1094	0.08448, 0.1152
	H <sub>L</sub>	0.2844	0.2875
	V <sub>L</sub>	0.2305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



$Re=5000$

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 <sub>L</sub>	0.1211	0.1135
	V <sub>L</sub>	0.2693	0.2602
BL1	Location, x ,y	0.0703, 0.1367	0.0786,0.1398
	H <sub>L</sub>	0.3184	0.3122
	V <sub>L</sub>	0.2643	0.2750
BR1	Location, x ,y	0.8086, 0.0742	0.8018, 0.0701
	H <sub>L</sub>	0.3565	0.3457
	V <sub>L</sub>	0.4180	0.4000
BL2	Location, x ,y	0.0117, 0.0078	0.0131, 0.0087
	H <sub>L</sub>	0.0156	0.0169
	V <sub>L</sub>	0.0163	0.0172
BR2	Location, x ,y	0.9805, 0.0195	0.9800, 0.0189
	H <sub>L</sub>	0.0528	0.0561
	V <sub>L</sub>	0.0417	0.394
BR3	Location, x ,y	-	-
	H <sub>L</sub>	-	-
	V <sub>L</sub>	-	-



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 <sub>L</sub>	0.1445	0.1257
	V <sub>L</sub>	0.2993	0.2827
BL1	Location, x ,y	0.0645, 0.1504	0.06842, 0.1664
	H <sub>L</sub>	0.3339	0.3490
	V <sub>L</sub>	0.2793	0.2975
BR1	Location, x ,y	0.7813, 0.0625	0.7956, 0.0537
	H <sub>L</sub>	0.3779	0.3478
	V <sub>L</sub>	0.4375	0.4327
BL2	Location, x ,y	0.0117, 0.0117	0.0099, 0.0099
	H <sub>L</sub>	0.0234	0.0263
	V <sub>L</sub>	0.0254	0.0256
BR2	Location, x ,y	0.9492, 0.0430	0.9553, 0.03101
	H <sub>L</sub>	0.1270	0.1112
	V <sub>L</sub>	0.0938	0.1000
BR3	Location, x ,y	0.9961, 0.0039	0.9967, 0.0033
	H <sub>L</sub>	0.0039	0.0033
	V <sub>L</sub>	0.0039	0.0033

در بخش‌های بعدی سابروتین‌ها و متن اصلی برنامه بررسی می‌شوند.

باقی مستندات از ورژن رایگان برنامه حذف شده است.