نهمین کنفرانس دینامیک شاره ها، اسفند ۱۳۸۳
دانشگاه شیراز، بخش مهندسی مکانیک

شبیه سازی عددی جریان سه بعدی سیال اطراف مکعب روی يك سطح با استفاده از روش چند شبکه ای

امین حیدری
دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیك
دانشگاه شیراز

محمود یعقوبی
استاد بخش مهندسي مکانیك
دانشگاه شیراز

ابراهیم گشتاسبی راد
استادیار بخش مهندسي مکانیك
دانشگاه شیراز

چکیده

روشهای چند شبکه ای ابزاری مناسب برای سرعت بخشیدن به همگرایی روشهای عددی و در نتیجه کاهش زمان محاسبات می باشند. در این تحقیق جریان سه بعدی سیال در حالت آرام اطراف یک مکعب روی يك سطح به کمک روش عددی حجم محدود مورد بررسی قرار گرفته و معادلات حاکم برای جریان پایدار و غیر قابل تراکم بر اساس الگوریتم SIMPLE بر روی شبکه جابجا شده حل گردید توزیع سرعت و فشار روی یک شبکه با تعداد نقاط ثابت بدست آمده و سپس همان مسئله به کمک روش چند شبکه ای در محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی بر اساس ارتفاع مکعب از ۱۰۰تا ۴۰۰ حل گردید. نرخ همگرایی و همچنین دقت حل در دو روش برای شرایط مختلف جریان مقایسه شد.

روش چند شبکه ای اعمال شده در این تحقیق بر اساس الگوریتم (Full-Multigrid, Full Approximation Solution) دارای چهار مرحله شبکه بندی می باشد, بطوریکه تعداد نقاط شبکه در هر جهت هنگام انتقال به یک مرحله بالاتر (شبکه ریزتر) دو برابر خواهد شد. ریزترین شبکه استفاده شده در روش چند شبکه ای همان شبکه بکار گرفته شده برای روش تک شبکه ای می باشد. محدوده محاسباتی به نحوي انتخاب شده تا جوابها مستقل از تغییر محدوده محاسباتی باشد.

نتایج برای میدان سرعت، نواحی جریانهای برگشتی وتوزیع فشار اطراف مکعب برای حالت چند شبکه ای ارائه شده است. مشاهده گردید که با انتخاب مناسب مراحل شبکه بندی، روش چند شبکه ای در مقایسه با روش تک شبکه ای با دقتی مشابه اما بسیار سریعتر به جواب می رسد.

واژه های کلیدی: جریان آرام, حجم محدود, چند شبکه ای, مکعب

۱-مقدمه

شاید به جرأت بتوان گفت که روشهاي عددي که اساس آنها الگوریتم SIMPLE [۱] مي باشد از پرکاربردترین روشهاي محاسباتي براي تعیین مشخصه هاي میدان جریان در مسائل مختلف مهندسي مي باشند. با وجود سادگي و قابلیت کاربرد این روشها در مسائلي که شامل انتقال حرارت، انتقال جرم، پارامترهاي توربولانسي و ... هستند , معایبي نیز وجود دارد که از جمله مهمترین آنها مي توان به کاهش نرخ همگرایي با افزایش تعداد تکرار اشاره کرد . این نقیصه که در اکثر روشهاي تکراري مشاهده مي شود به کمك آنالیز طیفي قابل بیان می باشد[۲،۳].

روش تکراري فقط قادر به کاهش آندسته از مودهاي فوریه مي باشد که طول موج آنها کوچکتر از اندازه شبکه باشد. روش چند شبکه اي با انجام تکرار روي شبکه هاي با اندازه متفاوت محدوده وسیعتري از طول موجها را در بر گرفته و باعث تسریع در روند همگرایي مي شود. با انتقال مسئله از يك شبکه ریز به يك شبکه درشتتر مؤلفه هاي همواره خطا با طول موجهاي بزرگ به مؤلفه هاي نوساني با طول موج کوچك تبدیل شده و انجام تکرار باعث حذف این مؤلفه ها خواهد شد . بنابراین با حل مسئله روي هر سطح از شبکه آندسته از مؤلفه هاي خطا که درآن سطح نوساني هستند حذف شده و به این ترتیب همگرایي سرعت پیدا مي کند. با توجه به نحوه تصحیح متغیرها دو روش کاملاً مجزا وجود دارد که عبارتند

از : ذخيره تصحيحات (Correction Storage, CS) كه در آن مقدار تصحيح روي شبكه درشت مستقيماً محاسبه شده و به شبكه ريزتر درونيابي مي شود. دوم ذخيره كامل متغيرها (Full Approximation Solution, FAS) كه در آن متغيرها به شبكه درشتتر انتقال يافته و اختلاف مقادير به دست آمده از حل روي شبكه درشت و مقادير اوليه اي كه به شبكه درشت انتقال پيداكرده به عنوان مقدار تصحيح متغير در نظر گرفته مي شود. الگوريتم CS براي مسائل خطي و FAS براي مسائل غيرخطي مناسب مي باشند[۴].

در هريك از دو روش فوق الگوريتمهاي متفاوتي براي ترتيب حل شدن مسئله روي سطوح مختلف شبكه وجود دارد. از مهمترين اين الگوريتمها مي توان به سيكلهاي FMG , F, W, V اشاره كرد . در اين پژوهش از روش FAS و سيكل FMG يا تكرار جانشينى استفاده شده و نحوه عملكرد آن در شكل ۱ آورده شده كه k نشان دهنده سطح شبكه مي باشد.با افزايش k شبكه ريزتر و با كاهشk شبكه درشت تر مي شود. جزئيات بيشتر راجع به روش FMG در بخش٤ آورده شده است .

۲-معادلات حاكم

براى بررسى جريان سيال و توزيع فشار، تنها معادلاتي كه بر جريان سيال حاكم مي باشد معادلات پيوستگي و Navier-Stokes هستند. اين معادلات به ترتيب قوانين بقاي جرم و مومنتوم را بيان كرده وبراي حالت پايدار و با جرم مخصوص و ويسكوزيته ثابت و در مختصات كارتزين بصورت زير نوشته مي شوند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = \mu \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial p}{\partial x_j} \qquad (۲)$$

معادلات بالا مي توانند به صورت يك معادله كلي به فرم زير نوشته شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}\right) + S_\varphi \qquad (۳)$$

در معادله (۳) ϕ متغيرعمومي و Γ_ϕ بيانگر ضريب پخش مربوطه و S_ϕ ترم منبع مي باشد . از آنجايكه مقدار ρ معلوم وثابت در نظر گرفته مي شود .معادله (۳) تنها براي مؤلفه هاي سرعت حل شده و در اين مورد $\Gamma_\phi = \mu$ و S_ϕ شامل گرايان فشار مي باشد .

۳- روش عددي

روش عددي استفاده شده در اين تحقيق روش حجم محدود مي باشد. در اين روش محدوده حل به حجم كنترل هاي كوچكتري تقسيم شده و با انتگرال گيري از معادله (۳) روي تك تك حجم كنترلها معادله مذكور به صورت زير تبديل مي شود .

$$a_P \phi_P = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \qquad (٤)$$

که در این معادله ϕ_p مقدار متغیر در حجم کنترل و ϕ_{nb} مقادیر متغیر در حجم کنترل هاي همسايه را نشان مي دهد b ترم منبع و a ضريب متغيرمي باشد که از دو ترم جابجايي و پخش تشکيل شده که هريك به شرح زير محاسبه مي شود .

ترم جابجایی:

$$C_p = (\rho u)_p A_p \qquad (٥)$$

و ترم پخش:

$$D_p = \frac{\Gamma_\phi A_p}{\delta} \qquad (٦)$$

که δ نشان دهنده فاصله تا مرکز گره همسایه و A_p سطح مربوطه می باشد. بسته به نوع تقريبي که بکار مي رود ضريب a مي تواند ترکیب مختلفی از C_p و D_p باشد که بطور مثال درتقریب Power Law مقدار a بصورت زیر محاسبه میشود.

$$\mathrm{a}(|\mathrm{Pe}|) = \left[\!\left[0, (1 - 0.1|\mathrm{Pe}|)^5 \right]\!\right] \qquad (٧)$$

که دراین معادله Pe عدد پلکت مي باشد و بصورت زير محاسبه مي شود

$$Pe_p = \frac{C_p}{D_p} \qquad (٨)$$

همانطور که ملاحظه مي شود با اعمال روش حجم محدود معادلات ديفرانسيل حاکم برمسئله به يك دستگاه معادلات جبري تبديل مي شوند که حل اين دستگاه نيازمند روشهاي خاصي مي باشد چرا که ضرايب و ترم هاي منبع به متغيرها وابسته مي باشند. روش SIMPLE روشی مناسب براي حل اينگونه معادلات مي باشد که با انجام تکرار روي معادلات موجود مسئله را حل مي کند .

در حل عددی معادلات با روشهاي تکراري که SIMPLE يکي از انواع آن مي باشد نرخ همگرايي ، با انجام تکرار کاهش مي يابد که با حل مسئله روي شبکه هايي با اندازه هاي متفاوت مي توان اين نقيصه را برطرف کرد. در اين پژوهش نيز براي سرعت بخشيدن به همگرايي روش SIMPLE ,از اين ترفند استفاده شده است .

٤- استفاده از روش چند شبکه اي (MG) جهت تسريع همگرايي روش SIMPLE

با انجام تکرار مؤلفه هاي فرکانس بالاي خطا حذف شده و مؤلفه هاي فرکانس پايين خطا در حل مسئله باقي مي مانند. اگر مسئله از يك شبکه ريز به شبکه اي درشتتر انتقال داده شود مؤلفه اي هموار خطا (فرکانس پايين) ، نوساني شده وانجام تکرار باعث حذف آنها مي شود . اين ترفندي است که در روش MG ازآن استفاده مي شود . در روش MG پس ازآنکه نرخ همگرايي روي يك شبکه کاهش يافت مسئله به شبکه اي درشتتر منتقل شده تا خطاهايي که انجام تکرار در شبکه ريز قادر به حذف آنها نمي باشد با انجام در شبکه درشتتر حذف شده و پس از آن مسئله مجدداً به شبکه ريز انتقال مي يابد. در روش FMG نخست چند تکرار روي مسئله اصلي و در دشترترين شبکه ($k=1$) انجام مي شود تا بدون صرف زمان محاسباتي زيادي حدس اوليه خوبي براي شبکه ريز بعدي ($k=2$) مهيا شود، سپس متغيرها به سطح ($k=2$)منتقل شده

وتكرار در اين سطح ادامه مي يابد . با مشاهده كند شدن روند همگرایی مقادير مانده ها براي متغيرهاي مختلف در تك تك حجم كنترل ها محاسبه شده و متغيرها , ضرايب ، ترمهاي منبع و مقادير مانده ها به سطح $(k=1)$ برونيابي مي شوند.

معادلاتي كه در اين مرحله روي سطح$(k=1)$ حل مي شوند معادلات مسئله اصلي نبوده بلكه معادلاتي جهت محاسبه تصحيحات مي باشند . اگر معادله (٤) كه نشانگر معادله مسئله اصلي است در سطح $(k=2)$ درنظر گرفته شود خواهيم داشت :

$$a_p^2\phi_p^2 = \sum a_{nb}^2\phi_{nb}^2 + b^2 \qquad (٩)$$

پس از انجام n تكرار اين معادله بطور كامل ارضا نشده و باقيمانده اي برابر $r^{2,n}$ خواهد داشت كه $r^{2,n}$ بصورت زير محاسبه مي شود :

$$a_p^{2,n}\phi_p^{2,n} - \sum a_{nb}^{2,n}\phi_{nb}^{2,n} + b^{2,n} = r^{2,n} \qquad (١٠)$$

حال با برونيابي پارامترهاي موجود به سطح $k=1$ معادله تصحيح شبكه درشت بصورت زير خواهد شد.

$$a_p^1\phi_p^1 - \sum a_{nb}^1\phi_{nb}^1 + b^1 = \overline{a_p^1\phi_p^1 - \sum a_{nb}^1\phi_{nb}^1 + b^1 - r^1} \qquad (١١)$$

مقادير زير خط نشان دهنده مقادير برونيابي شده از سطح $k=2$ مي باشند . با انجام m تكرار روي معادله (١١) مقدار ϕ به $\phi^{1,m}$ تبديل شده و مقدار تصحيح بصورت

$$\phi' = \phi^{1,m} - \phi^1 \qquad (١٢)$$

محاسبه مي شود . سپس ϕ' به سطح $k=2$ درونيابي شده و مقدار جديد $\phi^{2,n}$ بصورت زير محاسبه مي شود :

$$\phi^{2,n} = \phi^{2,n} + \phi'^2 \qquad (١٣)$$

پس از تصحيح متغيرها درسطح $k=2$ ، تكرار روي معادله (٩) ادامه مي يابد . با دستيابي به تقريب مورد نظر درسطح $(k=2)$ متغيرها به سطح $k=3$ درونيابي شده و تكرار روي اين سطح ادامه مي يابد و همانند حالت قبل با مشاهده كندشدن همگرايي تصحيحاتي روي سطح $k=3$ صورت مي گيرد .

اين روند تا زمان رسيدن به ريزترين شبكه ادامه يافته و پس ازآن يك سيكل V شكل شروع مي شود كه نحوه تصحيح متغيرها در آن همانند حالت قبل مي باشد. سيكل V تا همگرايي كامل مسئله در ريزترين شبكه ادامه مي يابد.

٥-نتايج

بر اساس مدل FMG برنامه عددی, برای حل معادله کلی (٣) به روش حجم محدود اطراف یک مکعب(شکل ٤) نوشته شده است. براي حصول اطمينان از صحت روش عددي، ابتدا جريان سيال در يك محفظه خالي با برنامه عددي شبيه سازي, مطالعه و نتايج حاصله با نتايج قبلي مقايسه گرديد .

علت انتخاب محفظه خالی به عنوان محكي براي آزمايش برنامه ، فراواني مطالعات انجام شده و نتايج حاصل از اين مطالعات بوده است. محفظه خالی با وجود هندسه ساده، داراي الگوي جرياني مي باشد كه پيچيده ترين هندسه ها از خود نشان مي دهند. عدد رينولدز مورد بررسي Re=۴۰۰ انتخاب شد تا با نتايج پژوهشهاي قبل[۵،۶] در اين عدد رينولدز برابر باشد.

شماي كلي محفظه خالی در شكل ۲ نشان داده شده است . جهت جريان آزاد در جهت مثبت محور x و عمق محفظه در جهت محور z درنظرگرفته شده است . در صفحه $ABCD$ شرط مرزی جريان آزاد بصورت $u = U_\infty$, $v = 0,\ w = 0$ و در بقيه صفحات شرط مرزي ديواره ، با عدم لغزش فرض شده است . براي حالت SG يك شبكه ۸۰×۸۰×۸۰ با تمركز بيشتر در كنار ديواره ها و در حالت MG از يك الگوريتم چهار مرحله اي استفاده شد، بدين ترتيب كه درشترين شبكه يك شبكه ۱۰×۱۰×۱۰ بوده و شبكه هاي ريزتر بعدي به ترتيب ۲۰×۲۰×۲۰ ، ٤۰×٤۰×٤۰ و ۸۰×۸۰×۸۰ مي باشند. محاسبات با استفاده از يك كامپيوتر P4 با سرعت 1.3 GH CPU و حافظه 1GB RAM انجام شد كه جزئيات بيشتر در جدول ۱ آورده شده است. براي محفظه خالي پروفيلهاي عمودي و افقي سرعت در صفحه تقارن بدست آمده و با نتايج حاصل از پژوهشهاي قبل در شكل۳ مقايسه شده است. همانطور كه مشاهده مي شود نتايج حاصله از مطالعه حاضر با نتايج قبل توافق بسيار خوبي دارد . همچنين نسبت زمان تک شبکه ای به چند شبکه ای (SG/MG) كه به نحوي نشان دهنده كارايي روش MG مي باشد محاسبه ونتايج جدول۱ نشان می دهد كه روش MG بسيار سريعتر همگرا مي شود .

جريان سيال اطراف يك مكعب روي سطح

بررسی جريان سيال اطراف يك مكعب از اهميت ويژه اي برخوردار است . چرا كه اين هندسه ساده مي تواند مدل ساده شده اي از موارد متعددي باشد كه در صنعت كاربرد دارند .به عنوان مثال مي توان به مسئله خنك كردن قطعات الكترونيك، جريان باد اطراف وسايل نقليه و يا ساختمانها اشاره كرد .

شماي كلي اين مسئله در شكل ۴ نشان داده شده است .فواصل در نظر گرفته شده در محدوده محاسباتي بايد بگونه اي باشد كه تأثيري درچگونگي جريان و توزيع فشار نداشته باشند. تعيين دقيق اين فواصل با انجام سعي و خطا ميسر خواهد شد اما در پژوهشهاي قبلي فواصل 10D در جلو، 15D در عقب و 10D در بالا و طرفين مكعب مناسب تشخيص داده شده است[۷]. در اين پژوهش نيز از اين مقادير براي فواصل مربوطه استفاده شد و مشاهده گرديد كه با افزايش اين فواصل تغيير محسوسي در جواب پيدا نمي شود.

شرايط مرزي حاكم بر اين مسئله به صورت $u = 0\ ,\ v = 0,\ w = U_\infty$ در صفحه ورودی، $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0$ در صفحه خروجی فرض می شود. $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0$ در صفحه بالايی و $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial z} = 0$ در صفحات جانبی،

تعداد نقاط شبكه بايد بگونه اي باشد كه جواب قابل قبولي ارائه دهد. براي پيش بيني بهتر جريان، تمركز شبكه در كنار ديواره ها بيشتر در نظر گرفته شده و در حالت تک شبکه ای مسئله در شبكه اي كه در هر مرحله ريزتر مي شد حل گرديد تا نهايتاً شبكه ۸۰×٦٤×۱۲۸ به ترتيب در جهتهاي Z,Y,X مناسب تشخيص داده شد . (با ريزتركردن شبكه در جوابها تغيير حاصل نشد). در حالت MG از چهار سطح شبكه استفاده شد و چون ريزترين شبكه يک شبكه۸۰×٦٤×۱۲۸ بود بنابراين شبكه های درشتتر بعدی به ترتيب عبارتند از: ٦٤×۳۲×٤۰ ، ۳۲×۱٦×۲۰ و ۱٦×۸×۱۰ .

حل معادلات مذكور در محدوده اعداد رينولدز ۴۰۰-۱۰۰ ($Re = \frac{\rho U_\infty D}{\mu}$)و به كمك يك كامپيوتر P4 ،با سرعت 3 GH CPU و حافظه 1GB RAM شبيه سازي شد كه جزئيات بيشتر در جدول ۲ آورده شده است .

جريان سيال

مطالعات بر روي جريان اطراف مكعب در اعداد رينولدز مختلف نشان داد كه اين جريان به شدت تحت تأثير اثرات سه بعدي هندسه جريان مي باشد . در شكل۵ خطوط جریان برای عدد رینولدز۲۵۰ و در ارتفاعهاي 0.25D,0.5D,0.75D و در شکل ۶ خطوط جریان برای اعداد رینولدز ۱۰۰- ۴۰۰ و در ارتفاع 0.5D ترسيم شده است . همانطور كه مشاهده مي شود با افزايش ارتفاع از سطح اثرات لايه مرزي سطح پايين كمتر شده و انحراف جريان از مسير جريان اصلی كمتر و به پشت مكعب محدود مي شود . با افزايش عدد رينولدز طول گردابه بوجود آمده در پشت مكعب بيش تر شده و مركز آن از مكعب دور مي شود. همچنين با افزايش عدد رينولدز جريانهاي برگشتي در سطوح جانبي مكعب نيز پديدار مي گردد .

شكل۷ خطوط جريان در صفحه تقارن مكعب براي اعداد رينولدز متفاوت را نشان مي دهد ملاحظه می شود كه با افزايش عدد رينولدز در سطح بالايي مكعب جريانهاي برگشتي پديد مي آيد و علاوه بر گردابه اوليه كه در پشت مكعب وجود داشت گردابه ديگري نيز ناشی از چرخش از کناره های مکعب به پشت شكل مي گيرد.

الگوي توزيع فشار در روي سطوح مكعب براي تمام اعداد رينولدز مورد بررسي تقريباً مشابه بوده و خطوط فشار ثابت در عدد رينولدز ۲۰۰ به عنوان نمونه در شكل ۸ نشان داده شده است . همانطور كه مشاهده مي شود خطوط فشاربالا مربوط به سطح جلويي مكعب مي باشد و در لبه های سطوح جانبي و بالا به علت جدايش جريان فشار كاهش مي يابد. با افزايش عدد رينولدز اختلاف فشار بين نقاط فشار بالا و فشار پايين افزايش مي يابد.

زمان محاسباتي

شبيه سازي اين مسئله به روش عددی در دو حالت MG و SG انجام شد. در هر عدد رينولدز و هر تكرار زمان محاسباتي (زمان CPU) برحسب ثانيه و ميزان باقيمانده ثبت گرديد. به علت اينكه حل كننده جريان در هر دو حالت الگوريتم SIMPLE بود و تعداد نقاط شبكه در حالت SG با تعداد نقاط شبكه در ريزترين مرحله حالت MG يكي بود بنابراين جوابهاي حاصل در هر دو حالت تفاوتي باهم نداشته و فقط زمان محاسباتي تغيير كرده است. شكل۹ مقدار باقيمانده مؤلفه سرعت در جهت جريان اصلي (w) را نسبت به زمانCPU در دو حالت SG و MG برای اعداد رينولدز متفاوت نشان مي دهد . مشاهده مي شود كه در تمامي اعداد رينولدز مورد بررسي روش MG بسيار سريعتر از روش SG به جواب رسيده است . اين نكته قابل توجه است كه با افزايش عدد رينولدز پارامتر SG/MG در جدول ۲ كاهش يافته و نهايتاً به يك مقدار حدي مي رسد. محققين ديگری مانند Lein. & Leschziner [۸] هم كه جريانهاي آرام و آشفته را به كمك روش چند شبكه اي مورد بررسي قرار داده اند به چنين روندي از نسبت زمان محاسبات در اعداد رينولدز بالا برخورد كرده بودند.

در ادامه كار تأثير تعداد سطوح شبكه بر سرعت همگرايي مورد بررسي قرار گرفت .به اين منظور در دو عدد رينولدز ۳۵۰ و ۴۰۰ مسئله با MG سه مرحله اي و پنج مرحله اي نيز مورد بررسي قرار گرفت كه جزئيات كار در جدول ۳ آورده شده است .ملاحظه مي شود كه با افزايش تعداد سطوح نرخ همگرايي بيشتر شده و تقريباً با اضافه كردن يك سطح به سطوح قبل نرخ همگرايي ۱/۵ برابر مي شود. شكل۱۰ نيز اين مطلب را بخوبي نشان مي دهد .

بايد توجه داشت كه افزايش تعداد سطوح تاحدي امكان پذير است كه اولاً حافظه كامپيوتر اجازه ذخيره سازي متغيرها در سطوح مختلف را بدهد وثانياً اندازه شبكه در اولين سطح (درشتترين شبكه) به حدي بزرگ نشود كه باعث عدم پيش بيني صحيح مسئله و ايجاد تصحيحات نادرست در الگوريتم ها و نهايتاً كاهش روند همگرايي شود .

نتیجه گیري

براي بررسی جريانهاي آرام سه بعدي چرخشي كه زمان محاسبات عددي بسيار بالاست ملاحظه شد كه:

۱. حل جريانهاي سه بعدي با استفاده از روش چند شبكه اي اگرچه در ابتدا نياز به برنامه ريزي مفصلتري دارد اما با افزايش شديد همگرايي و كاهش زمان محاسبات مي تواند مدل مطلوب عددي محسوب گردد.

۲. با افزايش سطوح شبكه عددی نرخ همگرايي بيشتر شده و بطور مثال در مسئله مورد بررسي با افزايش يك سطح نرخ همگرايي تغريباً ۱/۵ برابر گرديد.

مراجع

[1] Patankar, S. V.,” Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, McGraw-Hill, New York, 1980.

[2] Brandt, A., “Multi-level adaptive solutions to boundary-value problems”, *Math. Comput.* , Vol. 31, No. 138, pp.333–390, 1977.

[3] Hackbush,W., ”Multi-Grid Methods and Applications”, Berlin:Springer, 1985.

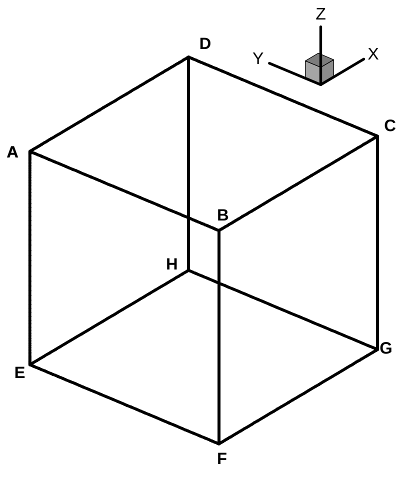
[4] Wesseling, P., ”An Introduction to Multigrid Methods”, Wiley, Chichester, 1992.

[5] Babu, V. and Korpela, S. A., “ Numerical solution of the incompressible three-dimensional Navier–Stokes equations”, *Comput. Fluids,* Vol.23, No.5, pp.675–691, 1994.

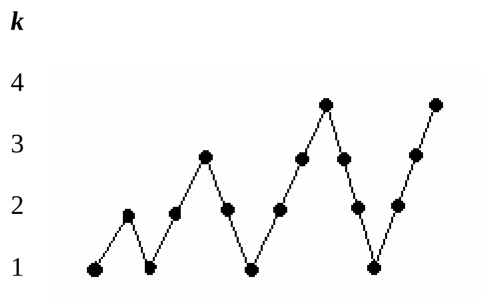
[6] Kato, Y., Kawai, H. and Tanahashi, T., “Numerical flow analysis in a cubic cavity by the GSMAC finite-element method”, *JSME Int. J. Series* II, Vol.33, pp.649-658, 1990.

[7] Velayati, E. and Yaghoubi, M.,” Numerical Study of Conjugate Heat Transfer from an array of bluff plates” *Int. J. of Heat and Fluid Flow, ND.26,pp80-91,2005.*

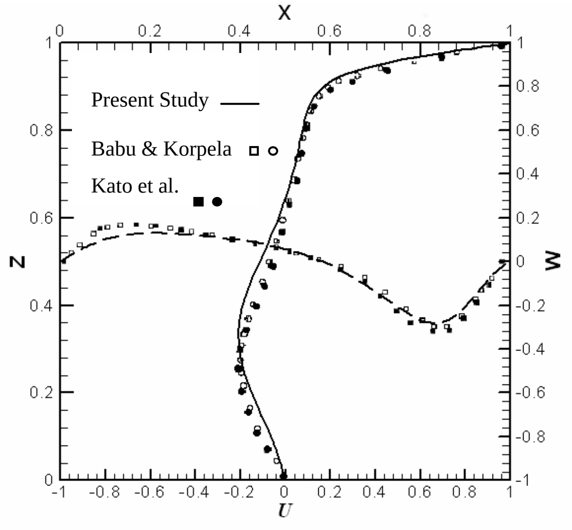
[8] Lein, F. S. and Leschziner, M. A., “Multigrid acceleration for recirculating laminar and turbulent flows computed with a non-orthogonal collocated finite-volume scheme”, C*omput. Methods Appl. Mech. Engrg.* , Vol. 118, pp. 351-390, 1994.

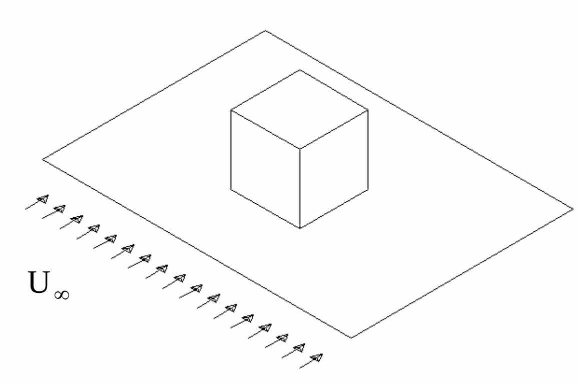


شكل۲- شمای كلی محفظه خالی با جريان موازی روی سطح آزاد



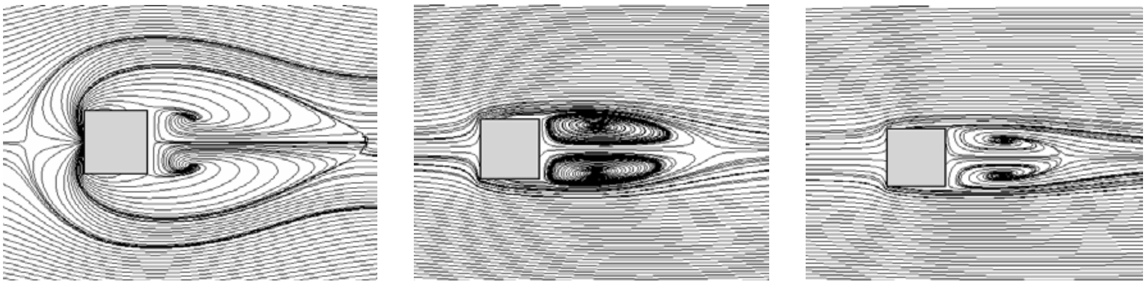
شكل۱- سيكل FMG در ماسبات عددی چند شبكه ای





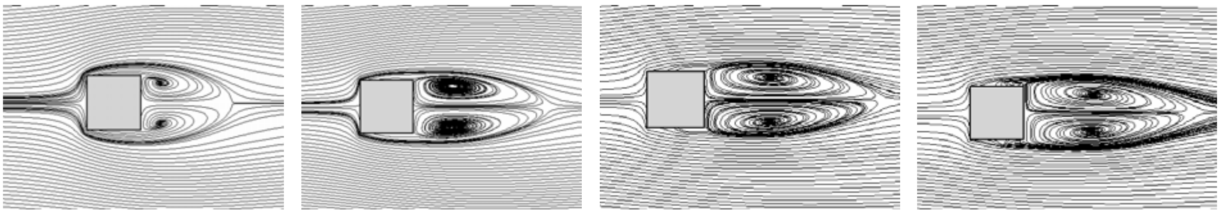
شکل ۳- پروفیلهای عمودی و افقی سرعت در صفحه تقارن محفظه خالی

شکل۴- شمای کلی مکعب روی یک سطح



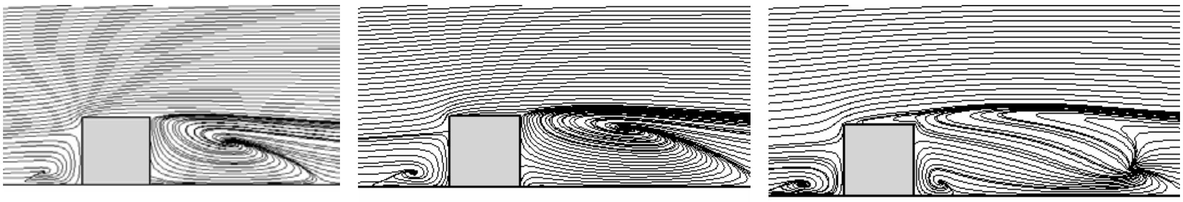
Y=0.25D *Y=0.5D* *Y=0.75D*

شکل۵- خطوط جریان در ارتفاع های متفاوت از سطح اطراف مکعب در Re=250



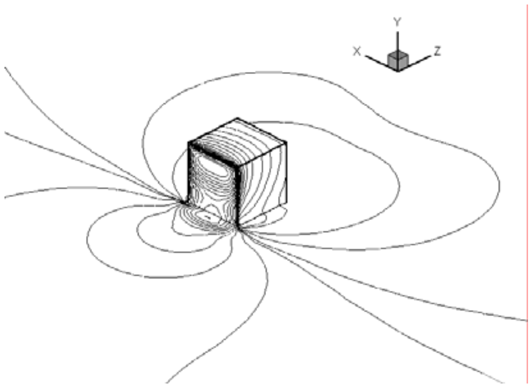
Re=100 Re=200 Re=300 Re=400

شکل۶- خطوط جریان در ارتفاع *Y=0.5D* از سطح در اطراف مکعب برای اعداد رینولدز مختلف

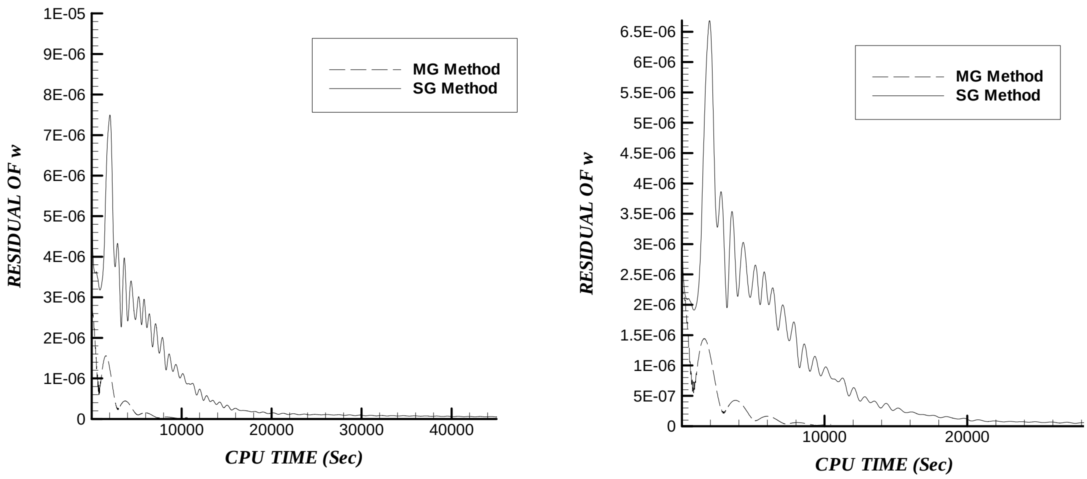


Re=100 Re=200 Re=400

شکل۷- خطوط جریان در صفحه تقارن مکعب برای اعداد رینولدز مختلف

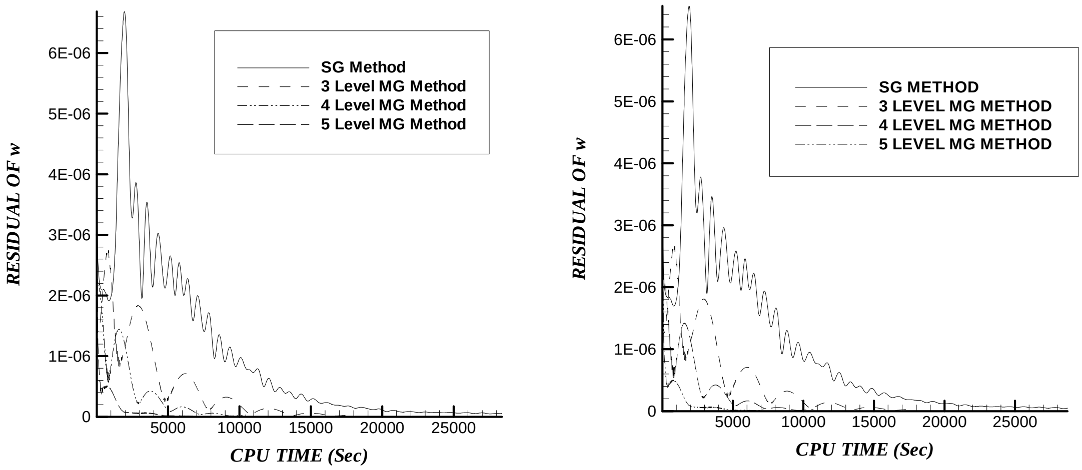


شکل ۸- خطوط فشار ثابت روی سطوح مکعب برای Re=200



Re=200 Re=400

شکل ۹- تغییرات باقیمانده مؤلفه سرعت در جهت جریان اصلی با زمان CPU



Re=350 Re=400

شکل ۱۰- تغییرات باقیمانده مؤلفه سرعت در جهت جریان اصلی با زمان CPU برای حالت MG با تعداد سطوح متفاوت

جدول۱-مشخصه های محاسباتی برای محفظه خالی

عدد رینولدز	نوع کامپیوتر	معیار همگرایی	زمان CPU (ثانیه)		نسبت زمان محاسباتی تک شبکه ای به چند شبکه ای (SG/MG)
			SG	MG	
Re = 100	1.3 GHz CPU 1GB RAM	5×10^{-8}	38166	5150	7.4

جدول۲-مشخصه های محاسباتی برای مکعب روی سطح

عدد رینولدز	نوع کامپیوتر	معیار همگرایی	زمان CPU (ثانیه)		SG/MG
			SG	MG	
Re = 100	3 GHz CPU 1GB RAM	5×10^{-8}	76663	13592	5.6
Re = 150	3 GHz CPU 1GB RAM	5×10^{-8}	52731	10760	4.9
Re = 200	3 GHz CPU 1GB RAM	5×10^{-8}	45091	10698	4.2
Re = 250	3 GHz CPU 1GB RAM	5×10^{-8}	37343	11354	3.3
Re = 300	3 GHz CPU 1GB RAM	5×10^{-8}	30464	11112	2.8
Re = 350	3 GHz CPU 1GB RAM	5×10^{-8}	28513	10482	2.7
Re = 400	3 GHz CPU 1GB RAM	5×10^{-8}	28935	10805	2.7

جدول۳-مشخصه های محاسباتی برای مکعب روی سطح برای تعداد سطوح شبکه متفاوت

عدد رینولدز	SG	3Lev MG		4Lev MG		5Lev MG	
	زمان CPU (ثانیه)	زمان CPU (ثانیه)	SG/MG	زمان CPU (ثانیه)	SG/MG	زمان CPU (ثانیه)	SG/MG
Re=350	28513	17812	1.6	10482	2.7	7081	4.0
Re=400	28935	17478	1.7	10805	2.7	7257	4.0