

واسنجی مدل اسماگورینسکی جهت شبیه‌سازی جریان درون حفره و مقایسه نتایج در شبکه های متمرکز و جابجا شده

گروه مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

حسن ساقی*

چکیده

در این مقاله، جریان سیال درون حفره به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. به منظور مدل نمودن اثرات آشفتگی از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و برای در نظر گرفتن اثرات زیر شبکه‌های گردابه‌های کوچک، از مدل زیر شبکه اسماگورینسکی استفاده شده است. در این روش، ضریب اسماگورینسکی مقدار ثابتی بوده که می‌بایست به صورت تجربی مشخص شود. مقادیر پیشنهادی توسط سایر محققین در محدوده [0.065-0.25] است. در این تحقیق، شبکه های متمرکز و جابجا شده در تحلیل جریان درون حفره مورد استفاده قرار گرفته و نتایج برای مقادیر مختلف ضریب اسماگورینسکی با یکدیگر مقایسه شد. همچنین توزیع سرعت در قسمت های مختلف حفره مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج عددی نشان می‌دهد، مدل‌های تهیه شده در این تحقیق با منظور نمودن ضریب اسماگورینسکی در بازه [0.5-0.7] با دقت خوبی قادر به شبیه سازی اینگونه مسائل هستند. همچنین استفاده از شبکه جابجا شده در مقایسه با شبکه متمرکز، به نتایج دقیق تری منجر می‌شود. با افزایش عدد رینولدز، گرادیان سرعت افقی و قائم در محل دیواره افزایش و در قسمت میانی حفره کاهش می‌یابد. همچنین شبکه‌های متمرکز و جابجا شده در اعداد رینولدز پائین نتایج نسبتاً یکسانی در پیش‌بینی سرعت افقی و قائم در مرکز حفره ارائه می‌نمایند. اما با افزایش عدد رینولدز، نتایج به دست آمده توسط شبکه جابجا شده از دقت بیشتری برخوردار بوده و نیز گرادیان سرعت افقی و قائم در شبکه متمرکز کمتر از مقادیر پیش بینی شده توسط شبکه جابجا شده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جریان درون حفره، مدل زیر شبکه اسماگورینسکی، شبکه جابجا شده، شبکه متمرکز.

Calibration of Smagorinsky Model to Simulate the Fluid Flow in the Cavity and Compare the Results on Collocated and Staggered Grids

H. Saghi

Civil Engineering Department, Hakim Sabzevari University, Sabzevari, Iran

Abstract

In this article, cavity fluid flow is simulated in Two-dimension. In order to model the effects of turbulence, large eddy simulation model has been used to include sub-network effects of small eddies, sub-grid Smagorinsky model was used. In this method, Smagorinsky coefficient is a constant value which should be determined by experiment. Suggested values by other researchers are in range 0.065-0.25. In this research, staggered and collocated grids have been used in analyzing lid-driven cavity flow and results were compared for different values of Smagorinsky coefficient. Furthermore, the velocity distribution was evaluated in different parts of the cavity. Comparison of numerical results shows that models presented in this research can simulate this kind of issues with high accuracy with assigning the Smagorinsky coefficient in range of 0.5-0.7. Also, using the staggered grid in comparison with collocated grid leads to more accurate results. With increase the Reynolds number, horizontal and vertical velocity gradient in wall area increases and decreases in middle area of cavity. Also, staggered and collocated grids in low Reynolds numbers present almost similar results in predicting horizontal and vertical velocity in center of the cavity. But with the increase in Reynolds number, the gained results replaced by the staggered grid are more exact and the gradient of horizontal and vertical velocity in the collocated grid, are less moved by the staggered grid than it was supposed to do.

Keywords: Large eddy simulation, Lid-driven cavity, Sub-grid Smagorinsky model, Staggered grid, Collocated grid.

۱- مقدمه

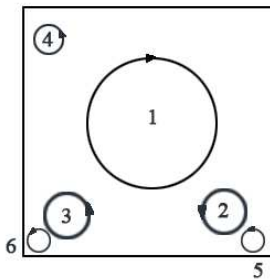
زمان است. لذا اثر آشفتگی جریان می‌بایست در حل معادلات حاکم به کمک مدل‌های آشفتگی لحاظ شود. مدل‌های مختلف آشفتگی هر یک برای رژیم‌های خاص جریانی و حتی در ناحیه‌ای خاص از میدان جریان معتبر و دقیق هستند. در این میان، روش شبیه سازی گردابه‌های بزرگ^۱، روشی موفق و نسبتاً جدید بوده که برای حل مسائل جریان درهم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش، بر مبنای جداسازی مقیاس‌های بزرگ و کوچک که بر اساس معیار طول جدایش قابل تفکیک هستند، بنا نهاده شده است. مقیاس‌هایی که طول مشخصه‌ای بزرگتر از طول جدایش دارند، مقیاس‌های بزرگ یا حل شده و بقیه مقیاس ها، مقیاس‌های کوچک یا زیرشبکه نامیده می‌شوند. در این روش، مقیاس کوچک به وسیله یک روش آماری به نام مدل زیرشبکه

بررسی رفتار جریان سیال، به روشهای مختلف تجربی، تحلیلی و عددی امکان پذیر است. امروزه با توجه به افزایش سرعت و دقت کامپیوترها، از یک طرف، استفاده از روشهای عددی رو به گسترش بوده و از طرف دیگر، روش تجربی با توجه به لزوم تکرار آزمایشات، پرهزینه است. لذا روشهای عددی و تحلیلی بیشتر مورد استفاده محققین قرار می‌گیرد. این دو روش مبتنی بر حل معادلات حاکم بوده که شامل معادلات مومنتم و پیوستگی هستند. با حل معادلات حاکم، پارامترهای سرعت و فشار در قسمت‌های مختلف محدوده سیال و در زمانهای مختلف، محاسبه می‌شوند. با افزایش سرعت جریان، رفتار سیال به تدریج از حالت آرام (لایه ای) به آشفتگی تبدیل می‌شود. در جریان آشفتگی، بواسطه حضور گردابه‌ها، نوسانات ذرات سیال وابسته به مکان و

¹ Large Eddy Simulation (LES)

از روش پالایش مش تطبیقی⁵ و در حالت شبکه درشت⁶، به بررسی پدیده حفره پرداختند. بعضی از محققین همچون هوا و همکارانش [11] با استفاده از روشهای لاگرانژی همچون روش هیدرودینامیک ذرات هموار⁷ به بررسی این پدیده پرداختند. در ادامه تحقیقات انجام گرفته در این زمینه، سوسا و همکارانش [12] به بررسی این مساله برای سیال ویسکوالاستیک پرداختند.

در اکثر تحقیقات انجام گرفته تاکنون، مدل آشفتگی و نیز ساختار شبکه مورد استفاده جهت مدلسازی پدیده حفره کمتر مورد توجه محققین بوده است. لذا هدف از این تحقیق، بررسی رفتار جریان درون حفره در فضای دو بعدی با استفاده از شبکه متمرکز و جابجا شده و نیز بررسی تأثیر مقدار ضریب ثابت اسمالگورینسیکی انتخابی در میزان دقت نتایج است. بدین منظور، حفره ای به ابعاد واحد در نظر گرفته و سیالی با لزجت سینماتیکی V و جریانی با سرعت $u_1 = u$ در وجه بالایی حفره جریان پیدا می‌کند. با افزایش سرعت u_1 ابتدا گردابه‌ای در قسمت میانی حفره تشکیل شده و با افزایش سرعت، گردابه‌هایی در قسمت‌های مختلف حفره به وجود می‌آید. ترتیب تشکیل گردابه‌ها در داخل حفره در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- محل تشکیل گردابه‌ها در داخل حفره با افزایش سرعت u_1

۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

تحلیل عددی جریان درون حفره شامل انتخاب معادلات حاکم، انتخاب نوع شبکه بندی، نحوه گسسته سازی معادلات حاکم، اعمال اثر آشفتگی جریان، اعمال شرایط مرزی و در نهایت، استفاده از روش مناسب جهت حل معادلات جبری به دست آمده از گسسته سازی معادلات حاکم است. معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی و مومنتم بوده که اصطلاحاً معادلات ناپویراستوکس نامیده شده و مطابق روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0.0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = \frac{-\partial P}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = \frac{-\partial P}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_y \quad (3)$$

در روابط فوق:

ρ : چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)،

V : بردار سرعت (متر بر ثانیه)،

نمایش داده می‌شود. در یک جریان آشفته، قسمت اعظم انتقال جرم، مومنتم و انرژی ذرات توسط گردابه‌های بزرگ انجام می‌شود، در حالی که، گردابه‌های کوچک، انرژی اخذ شده از گردابه‌های بزرگ را به گرما تبدیل و اثر زیادی روی جریان متوسط سیال ندارند. شکل و ساختمان مقیاس‌های بزرگ حرکت، به هندسه مسئله و طبیعت جریان وابستگی زیادی دارد. در حالی که، شکل و ساختمان مقیاس‌های کوچک معمولاً به این پارامترها بستگی نداشته و در کلیه جریان‌های درهم مشابه هستند [1]. به علت غیر خطی بودن معادلات ناپویر-استوکس، ارتباط دینامیکی میان مقیاس‌های حل وجود داشته و لذا نمی‌توان مقیاس‌های مختلف را به طور مستقل محاسبه نمود. بنابراین لازم است مقیاس‌های کوچک که در حل معادله وارد نمی‌شوند، شبیه سازی شوند. این امر با معرفی جمله اضافی در معادلات حاکم تکاملی مقیاس‌های حل شده انجام می‌شود. نشان دادن تک تک تأثیرات بین مقیاسی، معادل با روش شبیه سازی عددی مستقیم^۱ خواهد بود [2]. پارامترهای مهم که در دقت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ تأثیر گذار هستند شامل انتخاب تابع فیلتر مناسب و به کار گرفتن مدل فیزیکی دقیق برای مقیاس‌های حذف شده (مدل زیر شبکه مناسب) است.

جریان درون حفره، یکی از پرکاربردترین آزمایشات مورد استفاده در دینامیک سیالات محاسباتی است. زیرا محدوده مورد مطالعه و شرایط مرزی را به راحتی می‌توان در کد مورد نظر اعمال نمود. هرچند با وجود سادگی مسئله، تمام مشخصات فیزیکی یک جریان پیچیده را دارا بوده و به عنوان تست مبنای جهت کنترل صحت روشهای عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال پراساد و کوزف [3]، آزمایشات تجربی را در مورد پدیده کاویتی در حفره با نسبت ابعاد مختلف و به ازاء مقادیر مختلف عدد رینولدز انجام دادند. آنها با استفاده از دستگاه LDA^۲ اطلاعات مورد نیاز را اندازه گیری نموده و به این نتیجه رسیدند که نتایج به دست آمده، به شدت متأثر از عدد رینولدز و نسبت ابعاد حفره است. همچنین، شئو و سای [4] پدیده حفره را در فضای سه بعدی بررسی نمودند. آنها این کار را در حالت دائمی و با حل معادلات ناپویراستوکس به کمک روش المان محدود انجام دادند. پنگ و همکارانش [5] نیز پدیده حفره را در محدوده لایه‌ای و آشفته مورد بررسی قرار دادند. آنها معادلات ناپویراستوکس را به عنوان معادلات حاکم در نظر گرفته و جهت گسسته سازی معادله، از روش اختلاف محدود و مدل بالادست مرتبه هفتم و مرتبه ششم مرکزی، جهت گسسته سازی جملات انتقال و پخش استفاده نمودند. برانثو و سعد [6] پدیده کاویتی را در فضای دو بعدی و به کمک تکنیک چند شبکه ای مورد بررسی قرار دادند. گکارن و همکارانش [7] پدیده حفره را با حل معادلات ناپویراستوکس و نیز مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بررسی و پس از مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تجربی موجود، صحت آنها را تأیید نمودند. بعضی از محققین همچون آنوپیندی و همکارانش [8] و صفدری و کیم [9] از روش لتیز بولتزمن^۳ جهت شبیه‌سازی پدیده حفره پرداختند. همچنین لی و وود [10] با استفاده

¹ Direct Numerical Simulation (DNS)

² Bench mark

³ Laser-Doppler anemometer

⁴ Lattice Boltzmann

⁵ Adaptive mesh refinement

⁶ Coarse mesh

⁷ smoothed particle hydrodynamics (SPH)

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

$$\Delta = (\Delta_x \Delta_y)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

در رابطه فوق، \bar{S}_{ij} ، تانسوز نرخ کرنش مقیاس های بزرگ، Δ پهنای فیلتر و C_S ضریب اسماگورینسکی بوده که محدوده تغییرات آن $C_S = 0.065 - 0.25$ است [2]. \bar{u}_j و \bar{u}_i سرعتهای فیلتر شده در جهت محورهای x و y و Δ_x و Δ_y ابعاد شبکه در جهت محورهای x و y هستند.

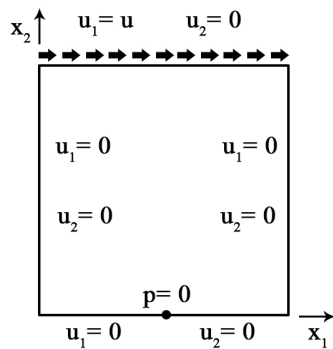
در این تحقیق، ثابت اسماگورینسکی در کل محدوده مقدار ثابتی در نظر گرفته شده و مقدار بهینه آن مشخص شده است. با توجه به اینکه اغتشاشات توربولانس در نزدیک دیواره به صفر میل می‌کند، ویسکوزیته گردابه‌ای در این محدوده به سمت صفر میل نموده و لذا لازم است تابع استهلاکی مطابق رابطه γ در مقدار ν_t ضرب شود. در این رابطه y^+ و u_t (سرعت برشی) به ترتیب با استفاده از روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند:

$$f_\mu = 1 - \exp(-y^+ / 26) \quad (7)$$

$$y^+ = \frac{\rho u_t y}{\mu} \quad (8)$$

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (9)$$

در مسئله حفره، شرایط اولیه شامل انتخاب مقادیر صفر برای تمامی پارامترهای سرعت و فشار در کل محدوده مورد مطالعه است. شرایط مرزی به کار رفته در حل مسئله نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- شرایط مرزی به کار رفته در حل مساله

در این تحقیق، معادلات جبری به دست آمده از گسسته سازی معادلات ناویراستوکس با استفاده از روش ADI حل شده است. این معادلات به صورت زیر است.

$$a_{PU} u_P = \sum a_{NB} u_{NB} - \frac{P^*(i+1, j) - P^*(i, j)}{dx} + S_u \quad (10)$$

$$a_{PV} v_P = \sum a_{NB} v_{NB} - \frac{P^*(i, j+1) - P^*(i, j)}{dy} + S_v \quad (11)$$

در این روابط، a_{PU} ، a_{NB} ضرایب ثابتی است که با توجه به مدل قابل محاسبه هستند. جهت محاسبه ضرایب از مدل قانون توانی

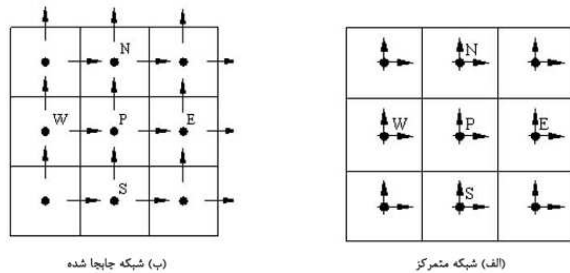
u, v : مؤلفه‌های سرعت در دو جهت x و y (متر بر ثانیه)،

μ : لزجت سیال (کیلوگرم بر مترثانیه)،

P : فشار و

S_ϕ : پارامتر منبع در جهت محور ϕ هستند.

جهت حل معادلات ناویراستوکس، ابتدا لازم است محل ذخیره پارامترهای اصلی جریان شامل میدان سرعت و فشار مشخص شود. در این راستا، دو نوع شبکه‌بندی شامل شبکه متمرکز و جابجا شده جهت ذخیره اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته است. در شبکه متمرکز، تمامی اطلاعات در مرکز سلول ذخیره می‌شود. در حالیکه در شبکه جابجا شده، فشار در مرکز سلول و مؤلفه های سرعت در سطح سلول ذخیره می‌شوند. محل ذخیره اطلاعات در دو نوع شبکه متمرکز و جابجا شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- محل ذخیره اطلاعات در دو نوع شبکه متمرکز و جابجا شده

از آنجائیکه در شبکه متمرکز، مؤلفه های سرعت در مرکز حجم کنترل تعریف می‌شوند، گرادین فشار به خوبی قابل شناسایی نیست. لذا، جهت رفع این مشکل، رای و چو روش میان‌یابی خود را جهت محاسبه جمله انتقال در معادلات ناویراستوکس پیشنهاد نمودند [13]. اما در شبکه جابجا شده، مؤلفه‌های سرعت بر روی سطوح حجم کنترل تعریف شده و نیازی به استفاده از درونیایی جهت محاسبه جمله انتقال نیست. [14]. در این تحقیق، در استفاده از شبکه جابجا شده، گسسته سازی زمانی به صورت مرتبه اول^۱، گسسته‌سازی مکانی جملات پخش^۲ و انتقال^۳ به ترتیب با استفاده از مدل درجه اول بالادست^۴ و مدل درجه دوم مرکزی^۵ انجام شده است. همچنین در استفاده از شبکه متمرکز، ترمهای پخش با استفاده از مدل بالادست و جمله انتقال با استفاده از روش میان‌یابی رای-چاو^۶، تخمین زده شده است.

در جریان سیال درون حفره، با افزایش سرعت جریان، به تدریج رفتار جریان از حالت لایه‌ای به حالت آشفته تبدیل می‌شود. در این تحقیق، جهت اعمال اثر آشفتگی جریان از مدل زیرشبکه اسماگورینسکی استفاده شده است. مدل اسماگورینسکی همانند اکثر مدل‌های مقیاس زیر شبکه‌ای موجود، از مفهوم لزجت گردابه‌ای استفاده می‌کند. در این روش، مقدار لزجت گردابه‌ای آشفته طبق روابط زیر قابل محاسبه است [3].

$$\nu_t = (C_S \Delta)^2 (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

¹ First order

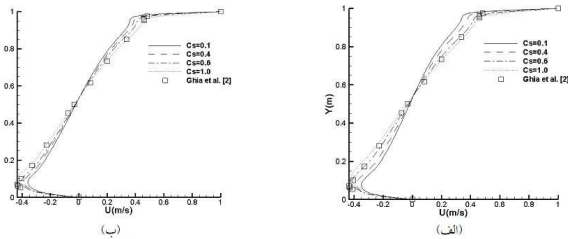
² Diffusion

³ Convection

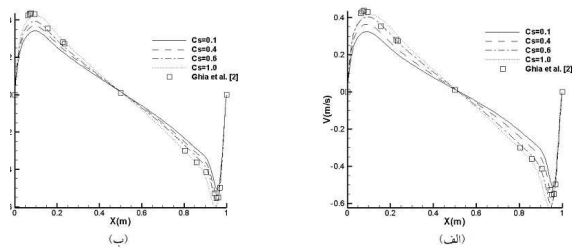
⁴ Upwind scheme

⁵ Central differencing scheme

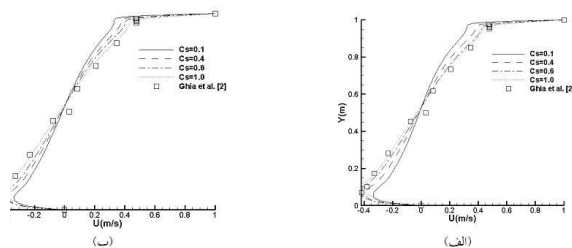
⁶ Rie-Chow



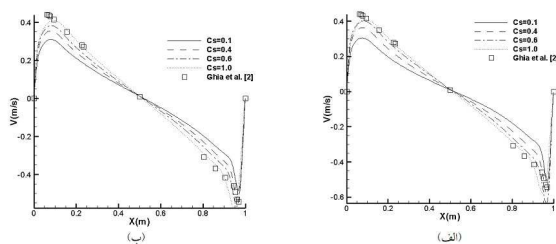
شکل ۶- سرعت افقی در مرکز حفره به ازاء مقادیر مختلف C_s به ازاء $Re=5000$ الف: شبکه جابجا شده ب: شبکه متمرکز



شکل ۷- سرعت قائم در مرکز حفره به ازاء مقادیر مختلف C_s به ازاء $Re=5000$ الف: شبکه جابجا شده ب: شبکه متمرکز



شکل ۸- سرعت افقی در مرکز حفره به ازاء مقادیر مختلف C_s به ازاء $Re=10000$ الف: شبکه جابجا شده ب: شبکه متمرکز



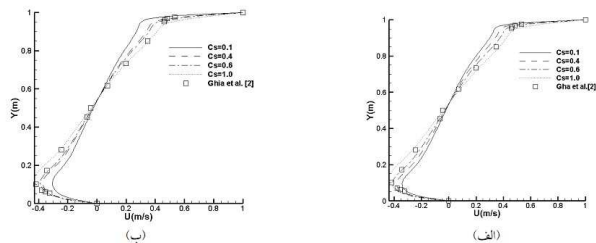
شکل ۹- سرعت قائم در مرکز حفره به ازاء مقادیر مختلف C_s به ازاء $Re=10000$ الف: شبکه جابجا شده ب: شبکه متمرکز

پس از تعیین مقدار بهینه برای ثابت اسماکورینسکی در قسمت قبل، در این مرحله، با استفاده از شبکه‌های متمرکز و جابجا شده، وضعیت جریان درون حفره به ازاء مقادیر مختلف سرعت و در نتیجه عدد رینولدز بررسی و توزیع سرعت در قسمت مرکزی حفره و نیز خطوط جریان داخل حفره تعیین شد. بدین منظور، ابتدا به کمک آنالیز حساسیت، ابعاد مناسب برای شبکه بصورتی انتخاب شد که اولاً دقت مورد نظر برای مسئله تأمین شده و نیز نتایج مسئله مستقل از ابعاد

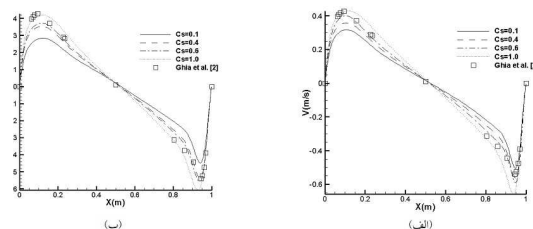
استفاده شده است. u_p, v_p مولفه های افقی و قائم سرعت در سلول مرکزی، u_{NB}, v_{NB} مولفه های افقی و قائم سرعت در چهار سلول اطراف سلول مرکزی، $P(i, j)$ مقدار فشار در سلول (i, j) و S_ϕ ترم منبع در جهت محور ϕ است.

۳- نتایج مدل

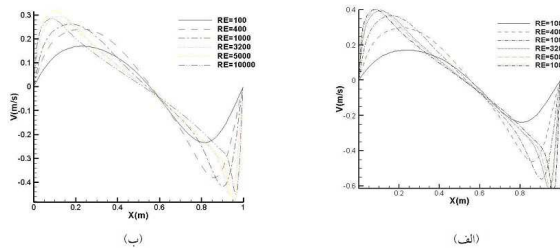
روش اسماکورینسکی، یکی از روشهای مناسب جهت حل جریانات آشفتنه است. یکی از نکات اساسی در استفاده از این روش، تعیین پارامتر C_s است. این ضریب ثابت نبوده و مقدار بهینه آن می‌بایست به صورت تجربی مشخص شود. در این قسمت، ابتدا به بررسی تأثیرات میزان ضریب ثابت اسماکورینسکی در دقت نتایج پرداخته و مقادیر مناسب برای این پارامتر پیشنهاد می‌شود. سپس با استفاده از دو نوع شبکه متمرکز و جابجا شده و به ازاء مقادیر مختلف عدد رینولدز، به بررسی جریان درون حفره پرداخته و نتایج به دست آمده مقایسه می‌شود. در این قسمت به بررسی مقدار بهینه برای این پارامتر پرداخته می‌شود. در این تحقیق، جهت معتبرسازی مدل، از نتایج ارائه شده توسط جیا و همکارانش استفاده شده است. اشکال ۴ الی ۹ نتایج به دست آمده را در دو شبکه متمرکز و جابجا شده نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد، انتخاب مقادیری بیش از مقادیر پیشنهادی توسط سایر محققین نیز می‌تواند نتایج بهتری را ارائه دهد. به عنوان مثال، ثابت اسماکورینسکی در این تحقیق در حدود [0.5-0.7] انتخاب شده است.



شکل ۴- سرعت افقی در مرکز حفره به ازاء مقادیر مختلف C_s به ازاء $Re=3200$ الف: شبکه جابجا شده ب: شبکه متمرکز



شکل ۵- سرعت قائم در مرکز حفره به ازاء مقادیر مختلف C_s به ازاء $Re=3200$ الف: شبکه جابجا شده ب: شبکه متمرکز

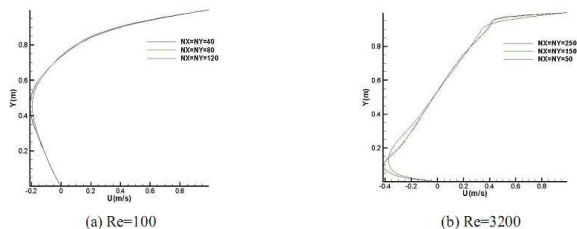


شکل ۱۳- سرعت قائم در دو شبکه متمرکز و جابجا شده به ازاء مقادیر مختلف عدد رینولدز الف: شبکه جابجا شده ب: شبکه متمرکز

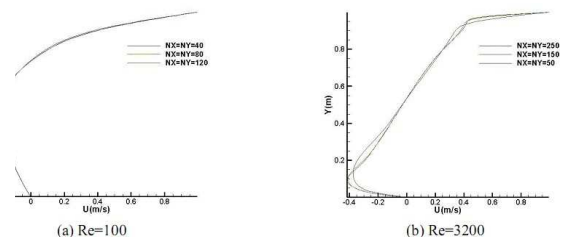
با توجه به نتایج به دست آمده و به ازاء عدد رینولدز 100، سرعت افقی در کف حفره برابر صفر، در وسط حفره برابر -0.2m/s و در بالای حفره برابر سرعت مرزی یعنی 1m/s است. با افزایش عدد رینولدز، حداکثر سرعت منفی در وسط حفره به تدریج افزایش یافته و موقعیت آن نیز به تدریج از وسط حفره به سمت پائین جابجا می‌شود. به عنوان مثال، به ازاء عدد رینولدز 10000، حداکثر سرعت منفی -0.42m/s در فاصله 0.07m از کف کانال اتفاق می‌افتد. لذا با افزایش عدد رینولدز، گرادیان سرعت در محدوده کف حفره افزایش یافته است. از طرفی با افزایش عدد رینولدز و بر اساس توزیع سرعت نشان داده شده در شکل ۱۲، گرادیان سرعت در محدوده بالای حفره نیز افزایش یافته است. علت افزایش گرادیان سرعت در دو طرف حفره، به دلیل کاهش اثرات شرایط مرزی ناشی از افزایش آشفتگی جریان می‌باشد. به ازاء عدد رینولدز 100، سرعت قائم در دو طرف حفره برابر صفر و در فواصل 0.25m و 0.8m به ترتیب برابر 0.17m/s و -0.24m/s است. با افزایش عدد رینولدز و بر اساس توزیع سرعت نشان داده شده در شکل ۱۳، گرادیان سرعت در دو طرف حفره و در مجاورت دیوار افزایش یافته است. به عنوان مثال، به ازاء عدد رینولدز 10000، حداکثر سرعت مثبت و منفی به ترتیب 0.4m/s و -0.62m/s در فواصل 0.07m و 0.96m اتفاق افتاده است که نشانه افزایش گرادیان سرعت در دو طرف حفره و در مجاورت دیواره است. در این شرایط نیز افزایش گرادیان سرعت ناشی از کاهش اثرات شرایط مرزی بر اثر افزایش آشفتگی جریان می‌باشد. لذا استفاده از شبکه متمرکز در پیش‌بینی جریان درون حفره و به ازاء اعداد رینولدز بالا، باعث کاهش گرادیان سرعت پیش‌بینی شده در دو جهت افقی و قائم می‌شود.

به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از دو شبکه متمرکز و جابجا شده، نمودار تغییرات سرعت افقی و عمودی در مرکز حفره و به ازاء اعداد رینولدز مختلف، به ترتیب مطابق اشکال ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

شبکه باشد. به عنوان مثال، تغییرات سرعت افقی و قائم در مرکز حفره، به ازاء اعداد رینولدز 100 و 3200 و به ازاء تعداد مختلف شبکه به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



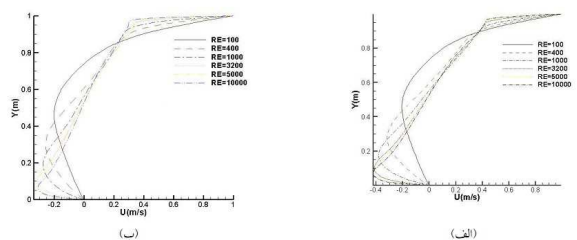
شکل ۱۰- آنالیز حساسیت تعداد مش مورد استفاده در بررسی جریان در شبکه جابجا شده



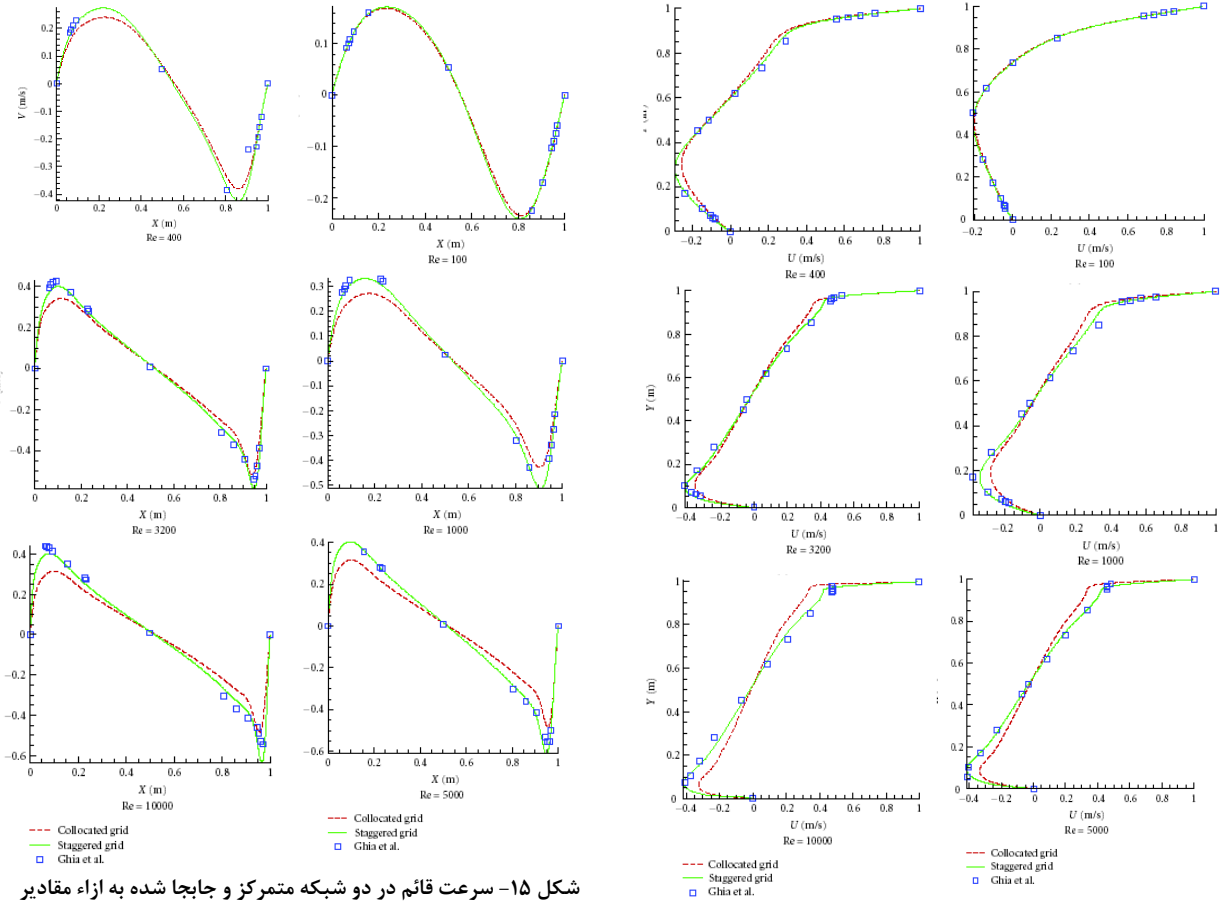
شکل ۱۱- آنالیز حساسیت تعداد مش مورد استفاده در بررسی جریان در شبکه متمرکز

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، در استفاده از شبکه متمرکز و جابجا شده و در اعداد رینولدز 100 و 3200، به ازاء تعداد مش بیشتر از 80 و 150 در جهت محورهای X و Y، نتایج مسئله مستقل از تعداد مش بوده و افزایش تعداد مش تنها باعث افزایش خطای گردکردن می‌شود.

در ادامه، پس از تعیین ابعاد مناسب برای شبکه، برای مقادیر مختلف عدد رینولدز، دو نوع شبکه متمرکز و جابجا شده مورد استفاده قرار گرفته و توزیع سرعت افقی و عمودی در مرکز حفره محاسبه شد. نتایج به دست آمده با نتایج ارائه شده توسط جیا [1] مقایسه و نتایج در اشکال ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۲- سرعت افقی در دو شبکه متمرکز و جابجا شده به ازاء مقادیر مختلف عدد رینولدز الف: شبکه جابجا شده ب: شبکه متمرکز



شکل ۱۵- سرعت قائم در دو شبکه متمرکز و جابجا شده به ازاء مقادیر مختلف عدد رینولدز

شکل ۱۴- سرعت افقی در دو شبکه متمرکز و جابجا شده به ازاء مقادیر مختلف عدد رینولدز

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، جریان سیال درون حفره به صورت دو بعدی شبیه سازی شده است. بدین منظور، دو نوع شبکه متمرکز و جابجا شده جهت مدلسازی عددی پدیده فوق، مورد استفاده قرار گرفت. همچنین مدل زیر شبکه اسماکورینسکی جهت اعمال اثر آشفتگی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد، در صورت استفاده از ضریب اسماکورینسکی در بازه $[0.5-0.7]$ مدل های عددی با دقت خوبی قادر به شبیه سازی پدیده کاویتی هستند. همچنین استفاده از شبکه جابجا شده در مقایسه با شبکه متمرکز، به نتایج دقیق تری منجر می-شود. علاوه بر آن، نتایج به دست آمده نشان داد، با افزایش عدد رینولدز، گرادیان سرعت افقی و قائم در محل دیواره افزایش اما در قسمت میانی حفره کاهش می یابد. در نهایت، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، شبکه‌های متمرکز و جابجا شده در اعداد رینولدز پایین، نتایج نسبتاً یکسانی در پیش‌بینی سرعت افقی و قائم در مرکز حفره ارائه می‌نمایند. اما با افزایش عدد رینولدز، نتایج به دست آمده توسط شبکه جابجا شده از دقت بیشتری برخوردار بوده و نیز گرادیان سرعت افقی و قائم در شبکه متمرکز کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه جابجا شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، شبکه های متمرکز و جابجا شده در اعداد رینولدز پایین نتایج یکسانی در پیش بینی سرعت افقی و قائم در مرکز حفره ارائه می‌نمایند. اما با افزایش عدد رینولدز، نتایج به دست آمده توسط شبکه جابجا شده دقت بیشتری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۴، با افزایش عدد رینولدز، گرادیان سرعت افقی در شبکه متمرکز کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود. در محدوده کف کانال تا محل حداکثر سرعت منفی، موقعیت سرعت حداکثر در هر دو شبکه برابر و مقدار سرعت پیش بینی شده و در نتیجه گرادیان سرعت در شبکه جابجا شده بیشتر است. در محدوده حداکثر سرعت منفی تا ابتدای حفره، با توجه به شیب تندتر نمودار سرعت در شبکه جابجا شده، گرادیان سرعت باز هم بیشتر است. لذا گرادیان سرعت در شبکه متمرکز با افزایش عدد رینولدز به خوبی قابل محاسبه نیست. شبکه متمرکز با افزایش عدد رینولدز گرادیان سرعت قائم را نیز به خوبی شبکه جابجا شده محاسبه نمی‌نماید. شکل ۱۵ توزیع سرعت قائم به ازاء عدد رینولدز 10000 را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده ملاحظه می‌گردد که گرادیان سرعت در شبکه متمرکز نسبت به نتایج شبکه جابجا شده و ارائه شده توسط جیا کاهش می‌یابد.

- Improved Incompressible SPH", *Procedia Engineering*, Vol. 126, 275:279.
- [12] Sousaa R.G., Pooleb R.J., Afonsoa A.M., Pinhoc F.T., Olivierad P.J., Morozove A., Alvesa M.A., Lid-driven cavity flow of viscoelastic liquids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, in press, 2016.
- [13] Rhie C.M. and Chow W.L, Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation, *AIAA Journal*, Vol 21, 1525-1532, 1983.
- [14] Versteeg H.K. and Malalaskera W., *An introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*, Harlow, UK: Longman, 1995.
- [1] Smagorinsky J, General Circulation Experiments With The Primitive Equations, *Mon. Weath. Rev.* Vol. 91(3): 99–164, 1992..
- [2] Ghia U., Ghia K.N. and Shin C.T, High-Re Solutions for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method, *Journal of Computational Physics*, Vol 48: 387-411, 1982.
- [3] Prasad A.K. and Koseff R., Reynolds number and end-wall effects on a lid-driven cavity flow, *Journal of Phys. Fluid* , 208-218, 1998.
- [4] Sheu T.W.H. and Tsai S.F., Flow topology in a steady three-dimensional lid-driven cavity, *International Journal Computers & Fluids*. Vol 31: 911–934, 2002.
- [5] Peng Y.F., Shia Y.H. and Hwang R.R., Transition in a 2-D lid-driven cavity flow, *International Journal Computers & Fluids*. Vol 32:337–352, 2003.
- [6] Bruneau C.H. and Saad M., The 2D lid-driven cavity problem revisited, *International Journal Computers & Fluids*. Vol 35:326–348, 2006.
- [7] Gorkan A., Battaglia F., Fox R.O., Hill J.C. and Reveilon J., Large eddy simulations of incompressible turbulent flows using parallel computing techniques, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol 56: 1819–1843, 2008.
- [8] Anupindi K., Lai W. and Frankel S., Characterization of oscillatory instability in lid driven cavity flows using Lattice Boltzmann method, *Computers & Fluids*, Vol. 92: 7-21, 2014.
- [9] Safdari A. and Kim K.C., Lattice Boltzmann simulation of the three-dimensional motions of particles with various density ratios in lid-driven cavity flow, *Applied Mathematics and Computation*. Vol. 265: 826-843, 2015.
- [10] Li Z. and Wood A., accuracy analysis of an adaptive mesh refinement method using benchmarks of 2-D steady incompressible lid-driven cavity flows and coarser meshes, *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Vol. 275, 262-271, 2015.
- [11] Hua Z., Zhenga X., Maa Q.W. and Duana W.Y., 2015. "Fluid Flow in a Cavity Driven by an Oscillating Lid by an