

بررسی اثر پروفیل سرعت ورودی در جریان متلاطم روی مانع مربعی چسبیده در کف کانال با استفاده از روش شبیه سازی ادیهای بزرگ

موسی فرهادی محمد رهنما

دانشجوی دکتری دانشیار

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان

E-mail: rahnama@mail.uk.ac.ir, farhadi@mail.uk.ac.ir

چکیده: در این تحقیق اثر پروفیل ورودی در جریان متلاطم بر روی مانع مربعی چسبیده در کف کانال با استفاده از روش شبیه سازی ادیهای بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی از مدل سلکتیو استراکچر فانکشن (SSF) جهت شبیه سازی ادیهای بزرگ استفاده گردیده و از دو نوع پروفیل سرعت در ورودی کانال استفاده شده است؛ ۱- ورودی یکنواخت و ۲- ورودی با توزیع توانی. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود و ترم جابجایی با استفاده از روش کوئیک تجزیه شده و از روش رانجی کوتاه مرتبه سه برای ترم زمان استفاده شده است. مقدار عدد رینولدز بر اساس سرعت ورودی در جریان یکنواخت و متوسط در ورودی با توزیع توانی برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. نتایج محاسبات به صورت متوسط زمانی خطوط جریان، منحنی های متوسط زمانی سرعت، کانتورهای متوسط زمانی انرژی جنبشی و لحظه ای گردابه ها نمایش داده شده است. در بررسی نتایج بدست آمده تغییر پروفیل سرعت در ورودی در عدد رینولدز ۱۰۰۰ تاثیر چندانی بر روی نتایج متوسط زمانی نداشته و تقریباً رفتار یکسانی را نشان می دهد. نتایج لحظه ای تغییرات شدیدتری را در مقایسه با نتایج متوسط زمانی از خود نشان داده و اثرات تغییر پروفیل را بهتر آشکار می سازد.

واژه های کلیدی: جریان متلاطم، شبیه سازی ادیهای بزرگ، مدل سلکتیو استراکچر فانکشن، مانع مربعی

فهرست علائم

u_i مولفه های سرعت لحظه ای

u بردار سرعت

x بردار مکان

x_i مختصات دکارتی

$G_{\Delta x}(x_i)$ تابع فیلتر

Re عدد رینولدز $U_{inlet}H/\nu$ و $U_{mean}H/\nu$

U_{mean} متوسط سرعت ورودی در ورودی با توزیع توانی

U_{inlet} سرعت ورودی در ورودی با توزیع یکنواخت

U_c متوسط سرعت جابجایی

H ارتفاع مانع مربعی
 ν لزجت سینماتیکی
 τ_{ij} تنشهای برشی ادیهای کوچک
 $E(K)$ تابع توزیع انرژی جنبشی
 K_c طول موج تابع مربعی
 ν_t^{SF} لزجت متلاطم محاسبه شده توسط روش استراکچر فانکشن (SF)
 P فشار
 C_k ثابت کلموگروف
 α زاویه
 Δx_i فاصله بین شبکه ها
 Δ کمترین فاصله شبکه
 t زمان

۱- مقدمه

مطالعه سه بعدی جریان متلاطم بر روی مانع داخل کانال قابل توجه بسیاری از محققین و طراحان بوده و این نوع از جریان در مسائل مختلفی از قبیل طراحی بردهای الکترونیکی، ساختمانهای بلند و برجهای مخابراتی مورد استفاده می باشد. بررسی دقیق این نوع جریان کمک بسیار خوبی برای مهندسان جهت طراحی ایمن و اقتصادی بوده و در مقایسه با روشهای تجربی بسیار ارزاتر تمام می شود.

یکی از جریان های پیچیده در مسائل مهندسی، جریان متلاطم عبوری بر روی یک مانع مربعی در داخل کانال می باشد. در این هندسه وجود لبه های تیز سبب پیدایش پدیده های پیچیده ای از جمله کشیدگی گردابه^۱ و نواحی چرخشی متعدد در جریان متلاطم گردیده، لذا بررسی این نوع جریان یکی از موضوعات مهم و جالب برای محققین می باشد. اولین بررسی آزمایشگاهی بر روی این هندسه توسط کاسترو و رویینز[۱]، هانت و همکارانش[۲] و بررسی های بیشتر توسط اسچوفیلد و لوگان [۳]، لاروس و همکارانش [۴]، مارتینوزی و تروپی [۵] و حسین و مارتینوزی [۶] صورت گرفته است. نتایج آزمایشگاهی بدست آمده توسط مارتینوزی و تروپی [۵] بر اساس عدد رینولدز ۴۰۰۰۰ بدست آمده که دارای جزئیات بیشتری نسبت به کارهای قبلی بوده لذا در اکثر مطالعات عددی از این نتایج استفاده شده است. هندسه مورد نظر توسط روشهای مختلفی مورد بررسی عددی قرار گرفته که نتایج حاصل از روش LES^2 دارای همخوانی بهتری با نتایج تجربی بوده است. اولین نتایج حاصل از روش LES توسط رودی [۷] و شاه و فرزیگر[۸] گزارش شده و در سالهای اخیر نیز این هندسه توسط کاراجنویک و داویدسون [۹]، رهنما و فرهادی[۱۰]، فرهادی و همکاران [۱۱] و فرهادی و رهنما [۱۲] و وانگ و یانگ [۱۳] با استفاده از مدل های مختلف LES مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در کارهای تحقیقاتی گذشته اعداد رینولدز مختلفی در این هندسه مورد بررسی قرار گرفته که نتایج حاصل با نتایج مرجع [۵] مورد مقایسه قرار گرفته که نتایج حاصل رفتاری مشابه با رفتار سیال در عدد رینولدز ۴۰۰۰۰ از خود نشان داده است. یکی از مسائل مهم در این بررسی ها چگونگی انتخاب شرایط مرزی ورودی در حل عددی بوده است. از آنجاییکه نتایج آزمایشگاهی بر اساس جریان ورودی توسعه یافته حاصل شده لذا جهت شبیه سازی عددی از روشهای مختلفی جهت رسیدن به این شرط استفاده شده است. از جمله

1- Vortex Stretching

1- LES (Large Eddy simulation)

این روشها می توان به پروفیل سرعت با توزیع توانی [۱۰ و ۱۲]، پروفیل سرعت آزمایشگاهی در ورودی [۹] و حل عددی کانال و استفاده از پروفیل سرعت توسعه یافته در ورودی این هندسه [۷ و ۸] اشاره نمود. در این تحقیق سعی شده است که اثر تغییر پروفیل سرعت ورودی بر روی میدان سیال در عدد رینولدز ۱۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل با تنها نتایج آزمایشگاهی موجود در این هندسه (مرجع [۵]) مورد مقایسه قرار گیرد. میدان سیال با در نظر گرفتن دو نوع توزیع سرعت در ورودی (توزیع یکنواخت و توزیع توانی) وبا استفاده از روش شبیه سازی ادیهای بزرگ (مدل SSF) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم

در روش شبیه سازی ادیهای بزرگ، حرکت ادیهای بزرگ در جریان متلاطم به صورت غیر دائم و سه بعدی با استفاده از روش حل مستقیم به دست آمده و اثر ادیهای کوچک نیز مدل می گردد. جهت جداسازی ادیهای بزرگ از ادیهای کوچک از روش فیلتر کردن استفاده می گردد که سرعت \bar{u}_i و u_i' به ترتیب سرعت فیلتر شده و سرعت ادیهای کوچک می باشد که با ید مدل گردد. تابع فیلتر $f(x_i, t)$ با پهنای Δx بر روی تابع $G_{\Delta x}(x_i)$ به صورت زیر عمل می نماید.

$$\bar{f}(x_i, t) = \int f(y_i, t) G_{\Delta x}(x_i - y_i) dy_i \quad f' = f - \bar{f} \quad (1)$$

با اعمال فیلتر فوق بر روی معادلات پیوستگی و حرکت ناویر-استوکس معادلات حرکت ادیهای بزرگ حاصل می گردد. با در نظر گرفتن شرط تراکم ناپذیری و نمایش معادلات بصورت بدون بعد، فرم کلی معادلات پیوستگی و ممتوم خواهد بود:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

در معادلات فوق \bar{P} ، \bar{u}_1 ، \bar{u}_2 و \bar{u}_3 به ترتیب فشار، سرعت در مسیر X ، Y و Z مربوط به ادیهای بزرگ بوده و ارتباط میان ادیهای بزرگ و ادیهای کوچک به صورت ترم تنش در معادله ممتوم ظاهر می گردد. عبارت $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$ تنش ادیهای کوچک می باشد که وظیفه اصلی آن انتقال انرژی از ادیهای بزرگ به ادیهای کوچک بوده و این انرژی در ادیهای کوچک از بین می رود. از آنجاییکه اثر این تنش یک اثر مستهلک کننده بر روی حرکت می باشد لذا این اثر به صورت لزجت جریان متلاطم نشان داده می شود.

$$\tau_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (4)$$

در مدل‌های مختلف LES روشهای متفاوتی جهت بیان ترم لزجت متلاطم ارائه گردیده که یکی از این روشها روش SSF می باشد که بر اساس روش SF¹ که به صورت زیر بیان می گردد ارائه شده است [۱۴].

$$\nu_t^{SF}(\mathbf{x}, \Delta c, t) = 0.105 \times C_k^{-3/2} \Delta c \sqrt{F_2(\mathbf{x}, \Delta c, t)} \quad (5)$$

در معادله (۵) $\Delta c = (\Delta x_1 \times \Delta x_2 \times \Delta x_3)^{1/3}$ و تابع F_2 به صورت:

$$F_2(\mathbf{x}, \Delta c, t) = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^3 \left\langle [\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) - \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x} + \Delta x_i, t)]^2 + [\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) - \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x} - \Delta x_i, t)]^2 \right\rangle \left(\frac{\Delta c}{\Delta x_i} \right)^{2/3} \quad (6)$$

که تابع استراکچر فانکشن در هر نقطه به صورت مربع متوسط اختلاف سرعت بین آن نقطه و شش نقطه مجاور آن محاسبه گردیده که این متوسط به صورت چهار نقطه ای در یک صفحه نیز قابل بیان می باشد. در مدل SSF لزجت متلاطم در مناطقی که جریان سه بعدی نمی باشد صفر در نظر گرفته می شود که این عمل با اندازه گیری زاویه (α) میان متوسط چرخش در شش نقطه با چرخش در نقاط همسایه آن صورت می گیرد (جهت اطلاع بیشتر به مرجع [15] مراجعه شود). با ضرب کردن معادله (5) در 1/56 خواهیم داشت.

$$v_t(\mathbf{x}, \Delta c, t) = 0.1638 \Phi_{20}(\mathbf{x}, t) \times C_k^{-3/2} \Delta c \sqrt{F_2(\mathbf{x}, \Delta c, t)} \quad (7)$$

تابع $\Phi_{20}(\mathbf{x}, t)$ به صورت:

$$\Phi_{20}(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \alpha \geq \pi/9 \\ 0 & \text{if } \alpha < \pi/9 \end{cases} \quad (8)$$

بیان می گردد. در بررسی های انجام شده در حل جریان بر روی صفحه ضخیم [16] نشان داده شد که استفاده از یک تابع با تغییرات نمایی نتایج بهتری از تابع پله ای نشان می دهد لذا در این تحقیق از تابع $\Phi'_{20}(\mathbf{x}, t)$ بجای تابع $\Phi_{20}(\mathbf{x}, t)$ استفاده گردید.

$$\Phi'_{20}(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 0 & \text{for } \alpha < \pi/18 \\ e^{-\left(\frac{d\alpha}{\pi/60}\right)^2} & \text{for } \pi/18 \leq \alpha \leq \pi/9 \\ \text{and } d\alpha = |\alpha - \pi/9| \\ 1 & \text{for } \alpha > \pi/9 \end{cases} \quad (9)$$

کلیه مقادیر مربوط به زوایا در معادله فوق به صورت رادیان می باشد.

۳- روش عددی

در روش عددی فوق معادلات حاکم با استفاده از روش احجام محدود تجزیه گردیده و عبارت جابجایی با استفاده از روش QUICK¹ تجزیه شده است. از روش رانجی- کوتا مرتبه سه جهت محاسبه متغیرها در زمان جدید استفاده شده است. از روش نیمه ضمنی گام جزئی² استفاده شده که در این روش معادله پیوستگی و ترم فشار در معادله ممتوم بصورت ضمنی بیان شده و سایر روابط بصورت صریح بیان شده است. این روش، پیشنهادی رامبونی بر عدم استفاده از ترم فشار در پیشگویی هر مرحله ارائه می نماید که همانند روشهای اصلاح فشار می باشد (یک الگوریتم مشابه SIMPLE). جزئیات بیشتر مربوط به روش عددی در مرجع [17] بیان گردیده است.

۴- شرایط مرزی و فضای محاسباتی

فضای محاسباتی یک فضای سه بعدی بوده که شامل یک مانع مربعی است که بر روی دیواره داخلی یک کانال قرار دارد (شکل ۱). ارتفاع مانع H و ارتفاع کانال دو برابر اندازه مانع می باشد. فاصله بالادست مانع ۷ برابر، پایین دست ۳ برابر و در مسیر Z نیز ۷ برابر اندازه مانع در نظر گرفته شده است. شبکه تولید شده دارای مینیمم مقدار 0.3/ در کنار دیوارها بوده و با ضریب 1/05 در همه مسیرها کشیده شده است. تعداد کل شبکه برابر 113x51x100 در مسیرهای x, y و Z می باشد.

بر روی دیواره های کانال و مانع مربعی شرط عدم لغزش سیال وجود داشته و در مسیر Z نیز شرط پرئودیک در نظر

1- QUICK (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics Scheme)

2- Semi-implicit fractional step method

گرفته شده است. در ورودی جریان از دو نوع پروفیل سرعت استفاده شده ۱- پروفیل با توزیع توانی و ۲- توزیع یکنواخت. در خروجی کانال نیز شرط مرزی جابجایی $(\partial \bar{u}_1 / \partial x) = 0$ در نظر گرفته شده که عبارت U_c برابر مقدار متوسط سرعت جابجایی است.

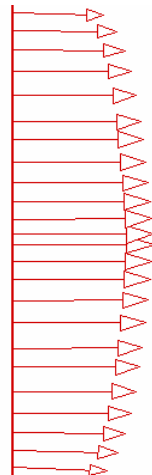
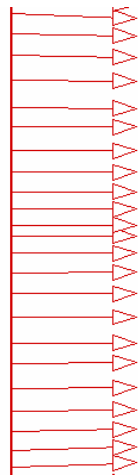
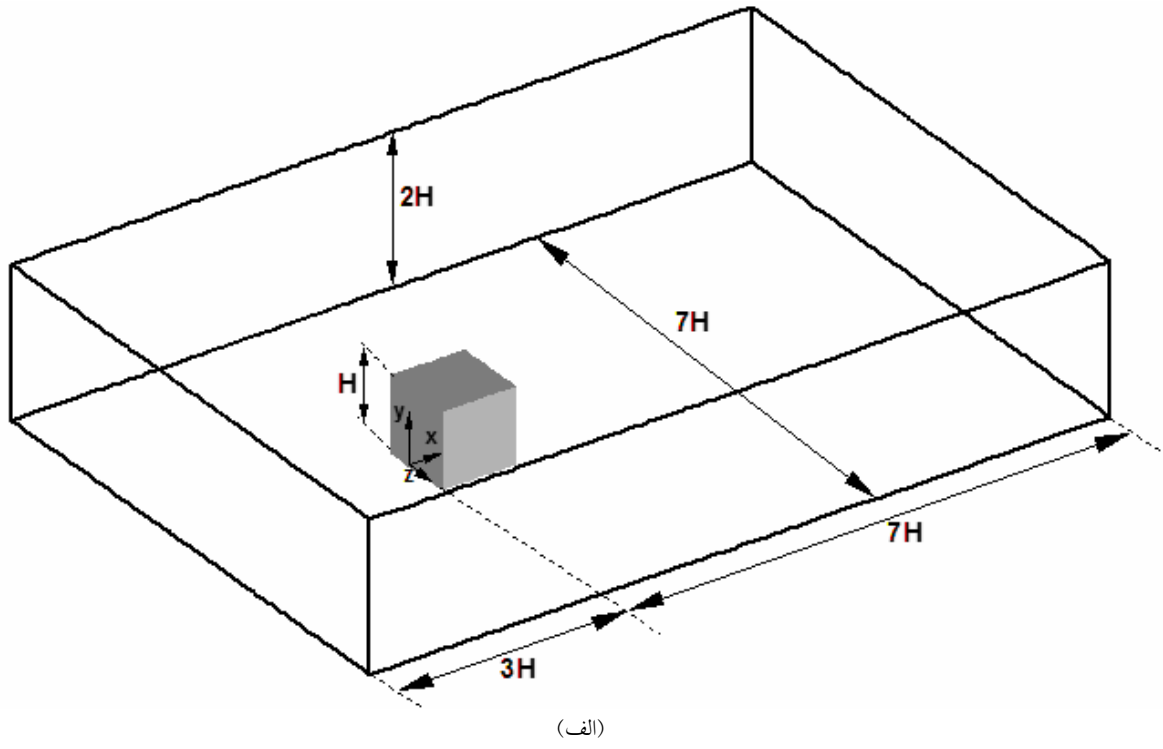
۳- نتایج

نتایج حاصل از این تحقیق بصورت متوسط زمانی و لحظه ای بیان گردیده که شامل متوسط زمانی خطوط جریان، پروفیل‌های سرعت و کانتورهای انرژی جنبشی جریان متلاطم و لحظه ای گردابه می باشد. در شکل (۲) خطوط متوسط زمانی جریان در صفحات $y=0$ و $z=0$ برای دو ورودی مختلف نمایش داده شده است. شکل کلی خطوط جریان برای هر دو ورودی یکسان بوده اما دارای جزئیات متفاوتی می باشد. ورتکس های نعل اسبی شکل برای هر دو حالت یکی بوده و شکل کلی جریان در بالادست تقریباً بدون تغییر باقی مانده است. در پایین دست جریان طول جدایش در ورودی توانی از جریان با ورودی یکنواخت کمتر بوده و بر روی دیواره بالایی یک ناحیه کوچک چرخشی (نقطه B) نیز دیده می شود که در ورودی با توزیع توانی این ناحیه وجود ندارد. علت این پدیده بواسطه طول ناحیه جدایش بزرگتر در ورودی یکنواخت بوده که موجب کاهش ممتوم سیال در نزدیکی دیواره بالایی شده و در نتیجه ناحیه چرخشی بر روی دیواره بالایی بوجود آمده است. در زیر ناحیه چرخشی در پایین دست، یک ناحیه چرخشی کوچکی (نقطه A) مشاهده می گردد که اندازه آن در ورودی یکنواخت بزرگتر از ورودی با توزیع توانی است. نقاط S1 و S2 مربوط به شکستگی خطوط جریان بوده که در نتایج آزمایشگاهی در عدد رینولدز ۴۰۰۰۰ نیز این نقاط دیده شده اند نیز در هر دو شکل مشاهده می گردد.

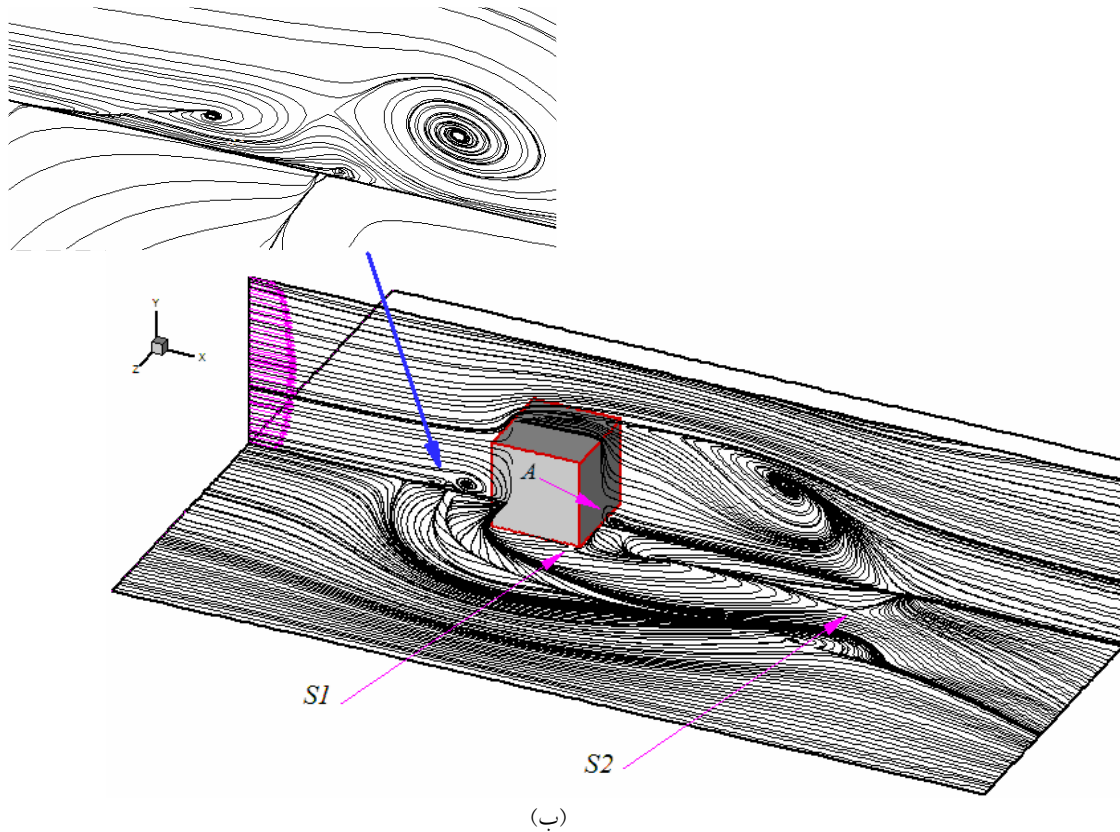
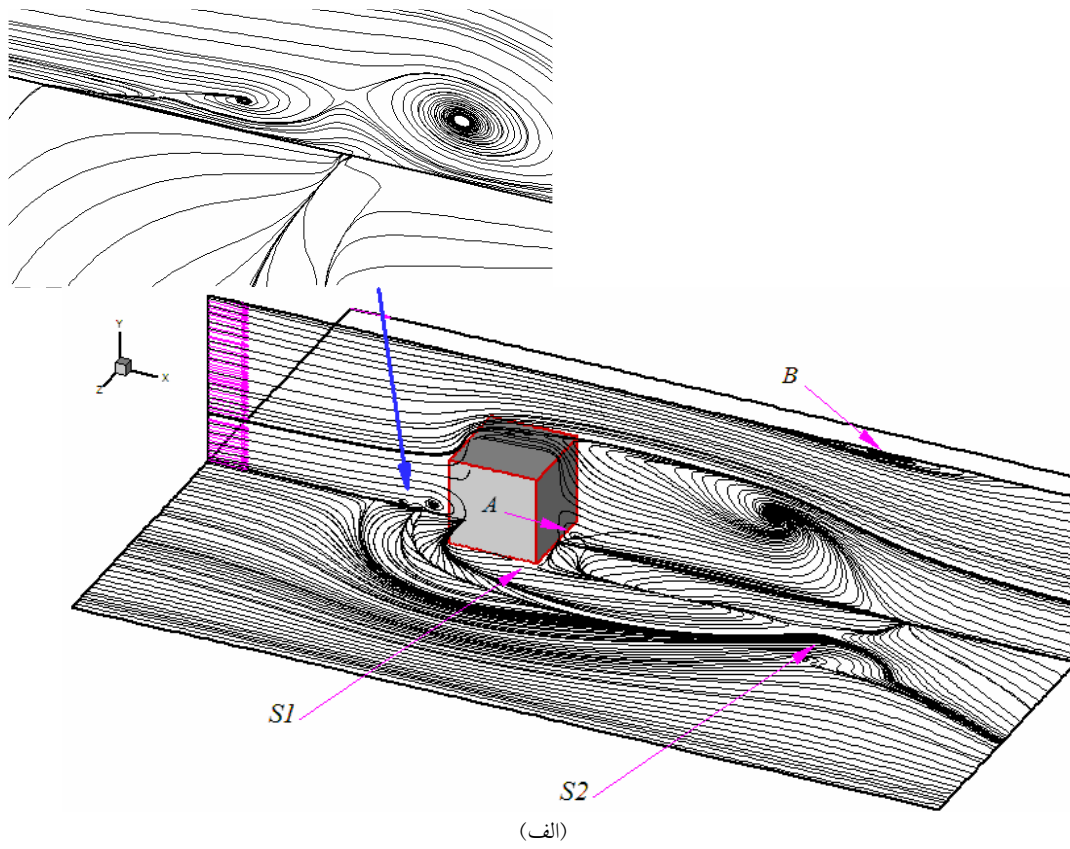
شکل (۳) توزیع متوسط زمانی سرعت بر روی مانع مربعی را در صفحه $z=0$ نشان می دهد. همانطور که از شکل مشاهده می گردد نتایج حاصل از هر دو توزیع سرعت در ورودی دارای رفتار یکسان بوده و رفتاری مشابه مقادیر آزمایشگاهی در عدد رینولدز ۴۰۰۰۰ را از خود نشان می دهند و توزیع سرعت متوسط در طول کانال نیز بجز ناحیه پایین دست جریان دارای رفتار تقریباً مشابه یکدیگر می باشد. علت این تفاوت در شکل کلی میدان جریان در ناحیه پایین دست می باشد. شکل (۴) توزیع متوسط زمانی انرژی جنبشی متلاطم سیال را در صفحه $y=0$ نشان می دهد.

تغییر پروفیل ورودی تغییر چندانی را در توزیع انرژی جنبشی نشان نداده و تنها تغییرات مشاهده شده بواسطه تغییر میدان جریان در پایین دست جریان می باشد که در پروفیل‌های ورودی متفاوت با یکدیگر فرق می کند. شکل (۵) کانتورهای مثبت و منفی گردابه های ω_y را برای دو ورودی مختلف در یک لحظه از زمان نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد توزیع گردابه ها در دو ورودی یکسان نبوده و پراکندگی گردابه ها در ورودی با توزیع یکنواخت بیشتر بوده ولی در جریان با توزیع توانی حجم گردابه ها و تراکم آنها بر مراتب بیشتر از حالت قبل است. علت این امر بواسطه تمرکز شدت تلاطم در ناحیه کوچکتر می باشد که موجب تولید گردابه های بیشتر با طول بقای بالاتر می گردد. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق تغییر جریان ورودی از ورودی یکنواخت به ورودی با توزیع توانی در عدد رینولدز ۱۰۰۰ تغییرات جزئی را در نتایج متوسط زمانی نشان داده اما در نتایج لحظه ای این تغییرات با شدت بیشتری نمایان شده است.

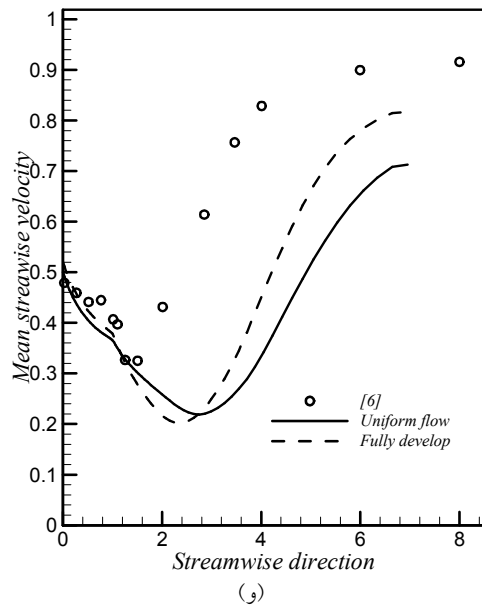
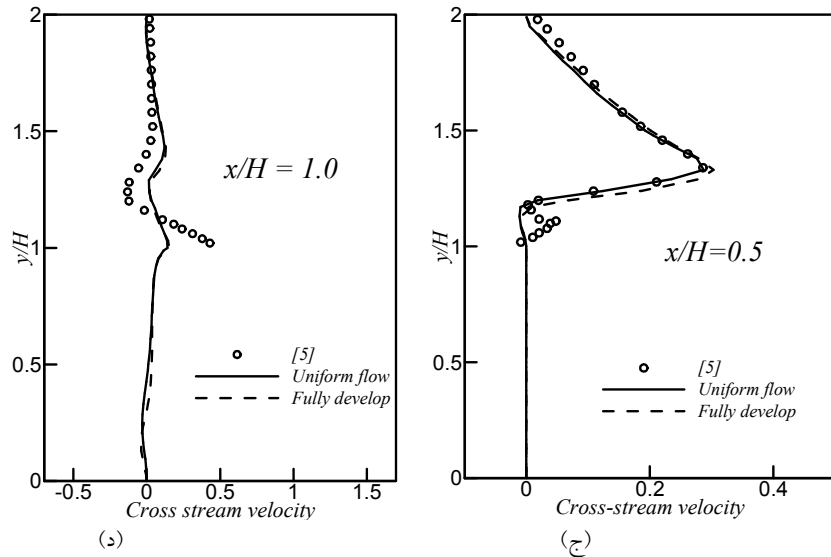
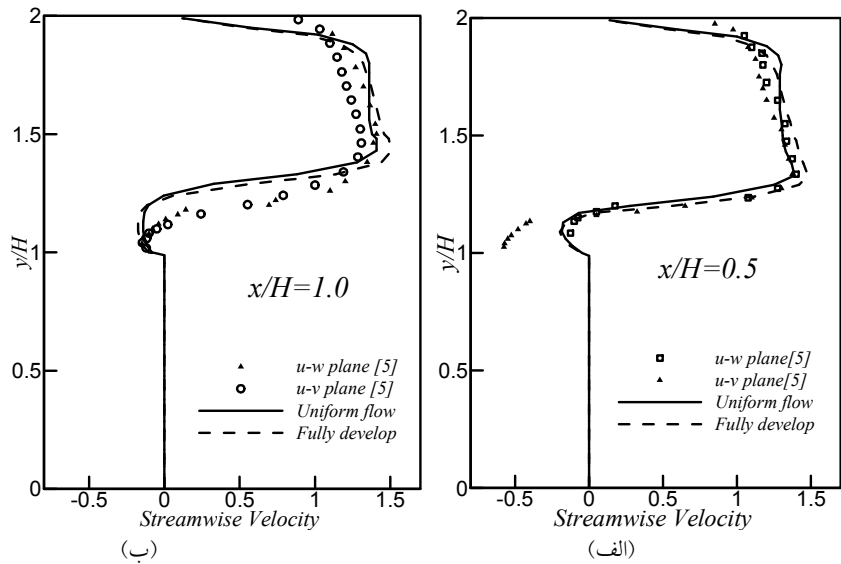
- [1] Castro, I. P., and Robins, A. G., "The Flow around the Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Stream", *J. of Fluid Mech.*, Vol. 79, pp. 307-335, 1977.
- [2] Hunt, J. C. R., Abell, C. G., Peterka, J. A., and Woo, H., "Kinematical Studies of the Flows around Free or Surface-Mounted Obstacles: Applying Topology to Flow Visualization", *J. of Fluid Mech.*, Vol. 86, pp. 179-200, 1978.
- [3] W. H. Schofield, W. H., and Logan, E., "Turbulent Shear Flow over Surface Mounted Obstacles", *ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 112, pp. 376-385, 1990.
- [4] Larousse, A., Martinuzzi, R. J., and Tropea, C., "Flow around Surface-Mounted, Three-Dimensional Obstacles", *In 9th Int. Symposia On Turbulent Shear Flow*, Munich, pp. 127-139, 1991.
- [5] Martinuzzi, R. J., and Tropea, C., "The Flow around Surface - Mounted Prismatic Obstacle in A Fully Developed Channel Flow", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 115, pp. 85-91, 1993.
- [6] Hussein, H. J., and Martinuzzi, R. J., "Energy Balance for Turbulent Flow around a Surface Mounted Cube Placed in a Channel ", *Physics of Fluid*, Vol. 8(3), pp. 764-780, 1996.
- [7] Rodi, W., Ferziger, J. H., Breuer, M., and Pourquie, M., *Workshop on LES of flows past bluff bodies*, Rotach-Egern, Germany, June, 1995.
- [8] Shah, K. B., and Ferziger, J. H., "A Fluid Mechanics View of Wind Engineering: Large Eddy Simulation of Flow Past a Cubic Obstacle", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67, pp. 211-224, 1997.
- [9] Krajnovic, S., and Davidson, L., "Large eddy simulation of the flow around a bluff body", *AIAA J.*, Vol. 40(5), pp. 927-936, 2002.
- [10] Rahnama, M., and Farhadi, M., "Large Eddy Simulation of Flow Over a Wall-Mounted Cube", *Proceeding of 12th Annual Conference of Computational Fluid Dynamics*, May 9-12, Ottawa, Canada, 2004.
- [11] Farhadi, M., Rahnama, M., and Hashemian, S. M., "Large Eddy Simulation of Flow Over a Wall-Mounted Cube (Re=1000)", *Proceedings of 12th international Conference of Iranian Society of Mechanical Engineering*, May 18-20, Tehran, Iran, 2004.
- [12] Farhadi, M., and Rahnama, M., "Large Eddy Simulation of Flow Over a Wall-Mounted Cube (Re=3200)", *Proceedings of IMEC 2004 international Mechanical Engineering Conference*, Dec. 5-8, Kuwait, 2004.
- [13] Hwang, J. Y., and Yang, K. S., "Numerical Study of Vortical Structures Around a Wall-Mounted Cubic Obstacle in Channel Flow", *Physics of Fluids*, Vol. 16(7), pp. 2382-2394, 2004.
- [14] Métais, O., and Lesieur, M., "Spectral Large Eddy Simulations of Isotropic and Stably-Stratified Turbulence", *J. of Fluid Mech.*, Vol. 239, pp. 157-194, 1992.
- [15] Lesieur, M., and Métais, o., "New Trends in LES of Turbulence", *Ann. Rev. of Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 45-82, 1996.
- [16] Suksangpanomrung, A., Djilali, N., and Moinat, P., "Large Eddy Simulation of Separated Flow over A Bluff Rectangular Plate", *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 655-663, 2000.
- [17] Suksangpanomrung, A., Investigation of unsteady separated flow and heat Transfer using direct and large-eddy simulations, *PhD Thesis, Department of Mech. Eng. University of Victoria, Victoria*, 1999.



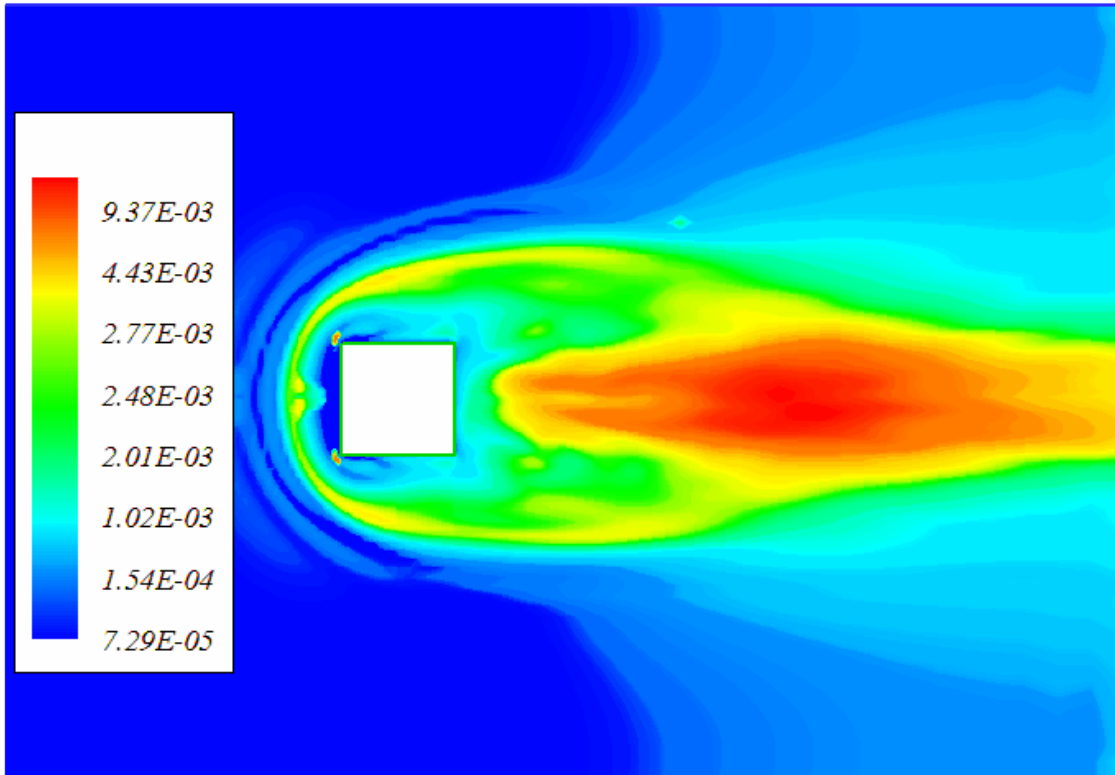
شکل ۱- (الف) هندسه مسئله و توزیع سرعت در ورودی کانال (ب) توزیع یکنواخت و (ج) توزیع توانی



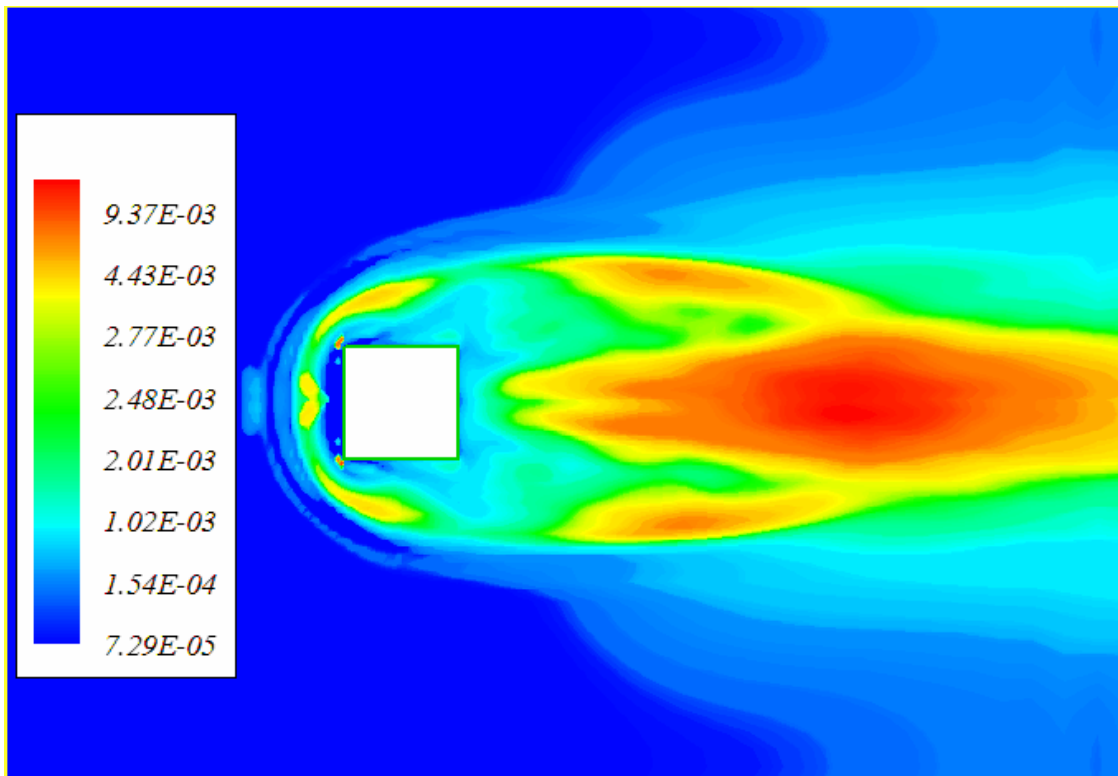
شکل ۲- خطوط متوسط زمانی جریان در صفحات $y=0$ و $z=0$ برای (الف) ورودی یکنواخت و (ب) ورودی با توزیع توانی



شکل ۳- (الف) و (ب) پروفیل متوسط زمانی سرعت در راستای محور x ، و (ج) و (د) در راستای محور y در مقاطع مختلف و (و) سرعت متوسط در طول کانال در صفحه $z=0$



(الف)



(ب)

شکل ۴- توزیع متوسط زمانی انرژی جنبشی متلاطم در صفحه $y=0$ برای ورودی با (الف) توزیع توانی و (ب) یکنواخت



(الف)



(ب)

شکل ۵- کانتورهای مثبت و منفی گردابه های ω_y در لحظه $tU/D=33/1$ واحد زمان (الف) ورودی یکنواخت (ب) ورودی با توزیع توانی در صفحه $z=0$