

## بررسی عددی جریان هوا از روی یک میله با مقطع مربعی واقع بین دو دیواره با استفاده از مدل توربولانس LES

ایلناز قالبساز جدی

اولدوز نورانی زنوز

دانشجوی کارشناسی ارشد - مهندسی مکانیک

تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مکانیک - گروه مهندسی مکانیک

محمد حسن جوارشکیان

محمد تقی شروانی تبار

استادیار

### چکیده

در این تحقیق جریان ناپایای متلاطم گذرنده از روی سیلندر مربعی واقع شده در یک کانال، به صورت عددی با روش حجم محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. در روند عددی فوق برای مدل سازی ترم توربولانس از شبیه سازی گردابه بزرگ (LES)، مدل تنش رینولدز (RSM) و مدل  $k - \epsilon$  استاندارد استفاده و تاثیر این سه مدل بررسی و نتایج این شبیه سازی با نتایج تجربی مرجع [۱] مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که مدل  $k - \epsilon$  دارای کمترین تطابق از لحاظ کمی با نتایج تجربی بوده در حالیکه نتایج مدل LES نسبت به مدل RSM دارای تطابق بهتری از لحاظ کمی و کیفی با نتایج تجربی می باشد. انتشار گردابه های مشهور کارمن<sup>۳</sup> نیز توسط دو روش LES و RSM مشاهده شده است.

واژه های کلیدی: مدل های LES، RSM،  $k - \epsilon$ ، سیلندر مربعی

### ۱- مقدمه

مطالعه جریان های مغشوش در اطراف سیلندرها به دلیل کاربرد فراوان آن در علوم مهندسی و اهداف آکادمیکی همواره مورد توجه محققین بوده است و تا کنون با روشهای عددی مختلف به این مسئله پرداخته شده است. یکی از خصوصیات اساسی این شکل جریان، ایجاد بارگذاری متناوب در جهت جریان و جهت عمودی، ناشی از تغییر فشار روی سطح سیلندر است که توسط انتشار متناوب گردابه بوجود می آید. اگر فرکانس بارگذاری نزدیک به فرکانس طبیعی ساختار سیلندر باشد، حالت تشدید باعث خرابی ساختار می شود.

مطالعات انجام شده بر روی جریان عبوری از روی یک سیلندر استوانه ای بیشتر از سیلندر مربعی بوده است. اگر چه انتظار می رود که ساختار جریان نزدیک گردابه<sup>۴</sup> از لحاظ مکانی در هر دوی آنها مشابه باشد، ولی عامل جدایش جریان در سطوح سیلندر در دو نوع جریان کاملاً متفاوت است. در مورد جریان عبوری از روی یک سیلندر دایروی، جدایش بر اثر

<sup>۱</sup>- Large Eddy Simulation

<sup>۲</sup>- Reynolds Stress Model

<sup>۳</sup>- Karman

<sup>۴</sup>- Near-wake flow

گرادیان معکوس فشار در جهت پایین دست جریان اتفاق می‌افتد که این عامل بر حرکت نقطه جدایش روی سطح سیلندر تاثیر می‌گذارد. هنگامیکه جریان از روی سطح یک سیلندر مربعی عبور می‌کند، موقعیت جدایش جریان به دلیل تغییر ناگهانی شکل هندسی، در گوشه‌های بالا دست جریان، ثابت شده است. این مشخصه در بعضی کاربردهای عملی در انتقال حرارت و جرم به ویژه در هندسه‌های محدود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از کاربردهای این مسئله در بررسی جریان حول نگهدارنده شعله در طراحی یک محفظه احتراق به منظور بهبود کارکرد آن می‌باشد [۲-۴].

پیش بینی و تحلیل سه بعدی جریان در اطراف جسم، مولفه مهمی در طراحی طیف وسیعی از سازه‌ها شامل وسایل نقلیه زمینی، بدنه اصلی هواپیما، زیردریایی‌ها، ساختمان‌های بلند و مانند آن می‌باشد. مطالعاتی در مورد جریان گذرنده از روی سیلندر مستطیلی انجام گرفته است، از جمله می‌توان به کار آقایان دیویز و مور (Davis and Moore) [۵] اشاره نمود آنها تحقیقات عددی در مورد جریان روی سیلندر مستطیلی انجام داده و نیروهای اعمالی بر روی سیلندر و ساختار گردابه را با نسبت‌های منطقی<sup>۵</sup> مختلف (۰/۶، ۱/۷) در زوایای حمله مختلف (۰، ۵ و ۱۵ درجه) در دو عدد رینولدز (۲۵۰، ۱۰۰۰) بر مبنای سرعت متوسط ورودی و ارتفاع سیلندر مورد مطالعه قرار دادند. لین و رودی (Lyn and Rodi) [۶] آزمایشهایی برای جریان حول سیلندر مربعی در عدد رینولدز نسبتاً بزرگ (۲۱۶۰۰) انجام داده‌اند. آنها در تحقیقشان بر لایه برشی تشکیل شده به واسطه جدایش جریان از گوشه بالا دست سیلندر مربعی بیشتر از ناحیه نزدیک گردابه تمرکز داشتند. اوکاجیما (Okajima) [۷] آزمایشهایی روی جریان عبوری از روی یک سیلندر مستطیلی با نسبت‌های منطقی مختلف (۱، ۲، ۳ و ۴) در اعداد رینولدز مختلف (۷۰-۲۰۰۰۰) انجام داد و رابطه بین عدد استروحال (St)<sup>۶</sup> و رینولدز را بدست آورد.

نسبت‌های مسدودسازی در تمام تحقیقات اشاره شده در بالا، کمتر از ۷/۵٪ است که در این موارد دیواره‌های کانال تاثیر عمده‌ای بر جریان گردابه نمی‌گذارد. دیویز و همکارانش (Davis et al.) [۸] مطالعات عددی و تجربی برای جریان عبوری از روی سیلندر مستطیلی انجام دادند که سیلندر در مرکز کانال قرار داشت و بیشترین نسبت مسدودسازی ۲۵٪ بود. در تحقیق آنها، عدد رینولدز در محدوده ۱۰۰ تا ۱۸۵۰، بر مبنای سرعت متوسط خط مرکز در ورودی و ارتفاع سیلندر محاسبه می‌شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب پسا (C<sub>D</sub>) با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و نواحی باز چرخشی در ناحیه گردابه نزدیک دیواره‌های کانال قابل توجه است. ناکاگاوا و همکارانش (Nakagawa et al.) [۹] اندازه‌گیری‌هایی در جریان مشابه با نسبت‌های منطقی متفاوت انجام دادند؛ نسبت مسدودسازی آنها در ۲۰٪ ثابت بود.

در بیشتر کارهای عددی انجام شده، بررسیها محدود به عدد رینولدز ۲۰۰۰ بوده است. هدف از این مقاله بررسی تاثیر مدل‌های مختلف توربولانس LES، RSM و  $k-\epsilon$  بر روی شبیه سازی جریان حول سیلندر مربعی در عدد رینولدز ۳۰۰۰ که منطبق بر شرایط آزمایشات تجربی منتشر شده [۱] می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار فلوئنت<sup>۷</sup> شبیه سازی انجام و با سه مدل توربولانس فوق میدان جریان حل شده و نتایج با داده های تجربی منتشر شده [۱] مقایسه گردیده است.

## ۲- معادلات حاکم

مؤلفه‌های لحظه‌ای سرعت ( $u_i$ )، به متوسط زمانی ( $\bar{u}_i$ ) و قسمت‌های نوسانی ( $u_i'$  یا  $u_i^F$ ) به صورت زیر تجزیه می‌شود:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (1)$$

<sup>5</sup> - Aspect ratio

<sup>6</sup> - Strouhal

<sup>7</sup> - Fluent

در این بررسی، معادلات سه بعدی تراکم ناپذیر پیوستگی و مومنتم به عنوان معادلات حاکم به کار رفته‌اند.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

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

در اینجا، اندیس  $i$  جهت را در سیستم مختصات کارتزین نشان می‌دهد؛  $P$ ،  $\tau_{ij}$  و  $\text{Re}$  به ترتیب فشار متوسط، مؤلفه‌های تنش مقیاس تحت شبکه<sup>8</sup> و عدد رینولدز می‌باشند. جزئیات بیشتر در مورد مدل‌های توربولانس  $k-\varepsilon$  و RSM در مرجع [9] داده شده است اما اطلاعات بیشتر در مورد مدل LES در قسمت بعد آورده شده است.

## ۲-۱-۱-۲ مدل LES

معادلات حاکم بکار رفته برای LES با استفاده از فیلتر کردن معادلات ناویر-استوکس وابسته به زمان در فضای فوریه یا فضای فیزیکی به دست آمده‌اند. این عملیات بطور موثری گردابه‌هایی را که مقیاس آنها کوچکتر از پهنای فیلتر یا عرض شبکه استفاده شده در محاسبات است، با فیلتر کردن، اثرات آنها را در نظر می‌گیرد و گردابه‌های بزرگتر از موارد فوق را مدل می‌نماید. بنابراین معادلات بدست آمده دینامیک گردابه‌های بزرگ را تعیین می‌کند. متغیر فیلتر شده  $\bar{\phi}$  با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x, x') dx' \quad (4)$$

که  $\phi$  شامل مؤلفه‌های سرعت،  $D$  میدان سیال و  $G$  تابع فیلتری است که مقیاس گردابه‌های حل شده را تعیین می‌کند. در این حل، جدا سازی حجم محدود به طور ضمنی عملیات فیلتر کردن را انجام می‌دهد.

$$\bar{\phi}(x) = \frac{1}{V^{1/3}} \int_{\Delta} \phi(x') dx' \quad x' \in \Delta \quad (5)$$

که  $V$ ،  $x'$  و  $\Delta = V^{1/3}$  به ترتیب حجم سلول محاسباتی، طول گردابه‌ها و عرض فیلتر می‌باشد. تابع فیلتر  $G(x, x')$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V, & x' \in \Delta \\ 0, & x' \text{ otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس فیلتر شده به صورت زیر می‌باشد:

<sup>8</sup> - Subgrid scale

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (8)$$

$\mu$  و  $\rho$  بترتیب چگالی و ویسکوزیته دینامیکی سیال است. تنش  $\tau_{ij}$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tau_{ij} \equiv \overline{\rho u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (9)$$

### ۳- پارامترهای جریان

در این تحقیق، تمام متغیرها با استفاده از سرعت متوسط ورودی ( $U_m$ ) و ارتفاع سیلندر ( $h$ ) بی بعد شده اند. عدد  $Re$  بر مبنای  $U_m$  و  $h$  در  $3000$  ثابت فرض شده است. نسبت مسدودسازی  $20\%$  و اندازه میدان محاسباتی در جهت عمود بر صفحه جریان ( $Z$ ) برابر  $h$  می باشد. شکل ۱ هندسه مساله و پارامترهای مربوط به آن را نشان می دهد.

### ۴- شرایط مرزی

مولفه های سرعت در مرز ورودی ثابت فرض شده و فشار استاتیک برون یابی شده است و در مرز خروجی فشار استاتیک ثابت در نظر گرفته می شود و بقیه متغیرها برون یابی شده است. برای تمام دیواره ها شرط عدم لغزش اعمال گردیده است و  $Y^+$  برای مدل های توربولانس لازمه کمتر از  $11/6$  تنظیم شده است. شرط مرزی پرئودیک در جهت عمود بر صفحه جریان ( $Z$ ) اعمال شده است. انرژی توربولانس و نرخ استهلاك این انرژی در مرز ورودی ثابت در نظر گرفته شده است.

### ۵- الگوریتم حل

در این بررسی، روش حجم محدود برای جداسازی معادلات حاکم به کار رفته است. الگوریتم SIMPLE برای ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتم برای به دست آوردن معادله فشار و سرعت استفاده شده است.

### ۶- نتایج

شکل ۲ شبکه بندی در صفحه  $x-y$  را نشان می دهد. شبکه اعمالی نوع هم مکان و غیر یکنواخت در سیستم مختصات کارترین بوده و فاصله شبکه در نزدیکی سیلندر،  $h/8$  است. تعداد نقاط شبکه به ترتیب در جهت جریان ( $x$ )، عمود بر جریان ( $y$ ) و عمود بر صفحه جریان ( $Z$ )، برابر  $105 \times 70 \times 25$  می باشد. مبدا مختصات در این شبیه سازی در وسط صفحه عمودی در قسمت پایین دست سیلندر قرار داده شده است. حل عددی با استفاده از سه مدل RSM، LES و  $k-\epsilon$  استاندارد انجام شده است. در این شبیه سازی از ترم های گسسته شده زمانی مرتبه اول برای روش RSM و مرتبه دوم برای  $k-\epsilon$  و LES استفاده شده است همچنین برای ترم های جابجایی از دقت مرتبه اول استفاده شده است. به دلیل ماهیت ناپایدار جریان، در تمام شبیه سازی ها با توجه به دوره کامل تناوب و نتایج تجربی موجود داده ها استخراج شده است. لازم به ذکر است که نتایج عددی مولفه های سرعت هم در زمان و هم در جهت عمود بر صفحه جریان ( $Z$ ) متوسط گیری شده و با نتایج تجربی ناکاگوا و همکارانش (Nakagawa et. al.) [۱] مقایسه شده است. در این شبیه سازی نتایج بعد از زمان  $t = \frac{L}{U_m}$  که

$L, U_m$  بترتیب سرعت متوسط ورودی و طول دامنه حل استفاده شده در جهت جریان می باشد، استخراج شده است. زمان تناوب موجهای جدا شده تقریباً "۰/۰۲ ثانیه پیش بینی شد که تعداد گامهای زمانی در این زمان تناوب ۴۰ گام در نظر گرفته شده است.

خطوط جریان مربوط به مدل LES در شکل ۳ نشان داده شده است. یک جفت گردابه چرخش خلاف هم<sup>۹</sup>، در پایین دست سیلندر نشان داده شده است. نواحی چرخشی دیگر در نزدیکی سطوح بالا و پایین سیلندر مربعی دیده می شوند که در مورد سیال حول سیلندر استوانه ای این نواحی مشاهده نمی شوند. نکته قابل توجه این است که جدایش جریان در لبه حمله روی می دهد و خط جریان دوباره به دیواره سیلندر نمی چسبد.

پروفیلهای سرعت متوسط در شکلهای ۴ و ۵ در موقعیتهای مکانی ۱/۵، ۶، ۳/۵، ۱  $x/h$  نشان داده شده اند. به دلیل تقارن در راستای  $y$ ، فقط نیمه پایینی پروفیل نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می دهد که اثر گردابه تا تقریباً به اندازه  $h$  از سیلندر ادامه می یابد. شکل ۵-الف بیان می کند که پروفیل سرعت متوسط عمودی در نزدیکی سیلندر مربعی بیشتر تحت تاثیر جفت گردابه های تشکیل شده در پشت سیلندر قرار می گیرد. شکلهای دیگر نشان می دهند که در فواصل دورتر، تاثیر گردابه ها خیلی کمتر است. نکته ای که باید به آن اشاره کرد این است که نتایج عددی پیش بینی خوبی را از بهبود سرعت در ناحیه دنباله، جایی که رفتار سیال به تغییرات کوچکی از پارامترها حساس می باشد، دارا هستند.

همانطور که در شکلهای ۴ و ۵ مشخص است، نتایج حاصل از مدل LES در حالت کلی تطابق خوبی را با نتایج تجربی دارا می باشد. این تطابق بویژه در ناحیه پایین دست سیلندر، در منطقه تشکیل و پخش گردابه ها قابل توجه است. مدل LES دارای قابلیت بهتری نسبت به دو روش دیگر در مدل کردن گردابه های بزرگ می باشد. مقایسه دو مدل RSM و  $k-\varepsilon$  نشان می دهد که روش RSM بهتر از  $k-\varepsilon$  قادر به پیش بینی پروفیلهای سرعت در پایین دست جریان می باشد.

شکل ۶ توزیع تنش برشی متوسط روی دیواره کانال و تاثیر سیلندر بر روی تنش را مشخص کند. این شکل بیان می کند که میزان حداکثر تنش در  $x/h = 0.65$  جایی که سیال به دلیل کاهش سطح مقطع شتاب می گیرد، اتفاق می افتد. به عبارت دیگر میزان حداقل تنش در پایین دست سیلندر در جایی اتفاق می افتد که جدایش جریان بمنظور تولید گردابه هایی با چرخشی برخلاف گردابه های کارمن بوجود می آید.

خطوط جریان در یک دوره تناوب ۰/۰۲ ثانیه از حرکت گردابه ها محاسبه شده است و در این بازه زمانی مسیر حرکت گردابه ها در شکل ۷ نشان داده شده اند.

جدول ۱، عدد استروحال ( $St$ ) محاسبه شده از این مقاله را با نتیجه تجربی ناکاگوا و همکارانش (Nakagawa et. al.) [۱] مقایسه می کند. لازم به ذکر است که عدد استروحال بر مبنای  $U_m$  و دوره تناوب محاسبه گردیده است.

## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق معادله ناویر-استوکس با مدل های مختلف توربولانس بر روی سیلندر مربعی واقع شده در یک کانال، به صورت عددی با روش حجم محدود مورد مطالعه قرار گرفت. مدل های استفاده شده در این شبیه سازی عبارتند از: شبیه سازی گردابه بزرگ (LES)، مدل تنش رینولدز (RSM) و مدل  $k-\varepsilon$ . نتایج این تحقیق نشان می دهد که مدل  $k-\varepsilon$  دارای کمترین تطابق از لحاظ کمی با نتایج تجربی بوده در حالیکه نتایج مدل LES نسبت به مدل RSM دارای تطابق بهتری

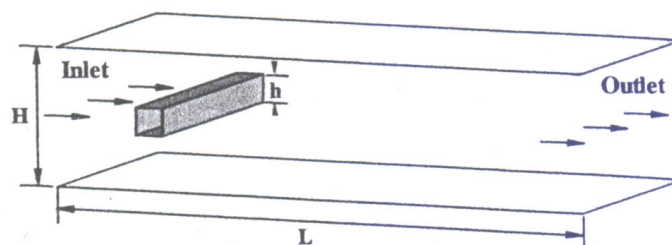
<sup>9</sup>- Counter Rotating

از لحاظ کمی و کیفی با نتایج تجربی می‌باشد. انتشار گردابه‌های مشهور کارمن<sup>10</sup> نیز توسط دو روش LES و RSM مشاهده شده است. عدد استروحال محاسبه شده در این شبیه سازی که با مدل LES بدست آمده تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. این تحقیق نشان می‌دهد مدل LES می‌تواند نسبت به دو مدل دیگر نتایج بهتری را در اینگونه شبیه سازی ها از خود نشان دهد. بعبارت دیگر مومنتوم، جرم، انرژی و سایر پارامترها، بیشتر توسط گردابه های بزرگ منتقل می‌شوند و گردابه های کوچک کمتر وابسته به هندسه بوده و بیشتر به ایزوتروپیک بودن تمایل دارند لذا تأثیرپذیری گردابه های بزرگ از هندسه و شرایط مرزی جریان نقش تعیین کننده ای دارد که دقیقاً این نکته در شبیه سازی جریان سیال با مدل LES بوسیله فیلتر کردن گردابه ها در نظر گرفته شده است.

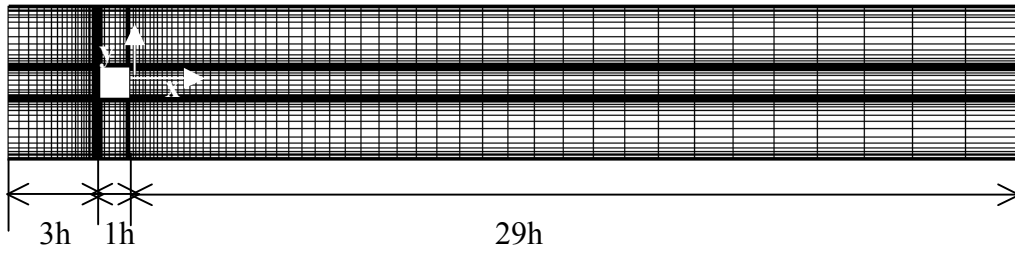
## ۸- مراجع

- [1] Nakagawa S, Nitta K, Senda M. An experimental study on unsteady turbulent near wake of a rectangular cylinder in channel flow. *Exp Fluid* 1999; 27(3): 284-94.
- [2] Nakagawa S, Senda M, Hiraide A, Kikkawa S. Heat transfer characteristics in a channel flow with a rectangular cylinder. *JSME Int J B* 1999;42(2):188-96.
- [3] Bakrozis AG, Papailiou DD, Koutmos P. A study of the turbulent structure of a two-dimensional diffusion flame formed behind a slender bluff-body. *Combust Flame* 1999; 119(3): 291-306.
- [4] Yang KS, Kim DH, Eom JS. Confined vortex shedding in a planner combustor. In: 4<sup>th</sup> JSME-KSME Thermal Engineering Conference, vol. 3, 2000. p. 463-68.
- [5] Davis R W, Moore EF. A numerical study of vortex shedding from rectangles. *J Fluid Mech* 1982;116:475-506.
- [6] Lyn DA, Rodi W. The flapping shear layer formed by flow separation from the forward corner of a square cylinder. *J Fluid Mech* 1994;267:353-76.
- [7] Okajima A. Strouhal numbers of rectangular cylinders. *J Fluid Mech* 1982; 123:379-98.
- [8] Davis R W, Moore EF, Purtell LP. A numerical- experimental study of confined flow around rectangular cylinders. *Phys Fluids* 1984;27(1):46-59.
- [9] Versteeg H.K. & Malalasekera W., *An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method*, Longman Scientific & Technical 1995

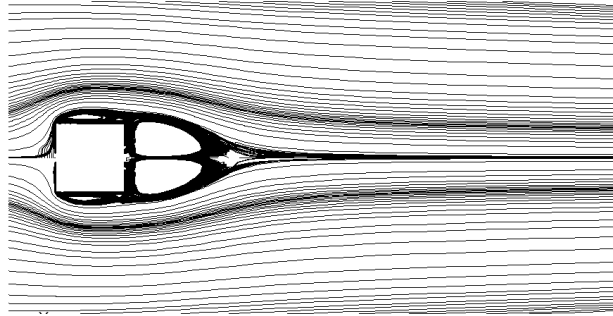
## ۹- شکلها، جدولها و نمودارها



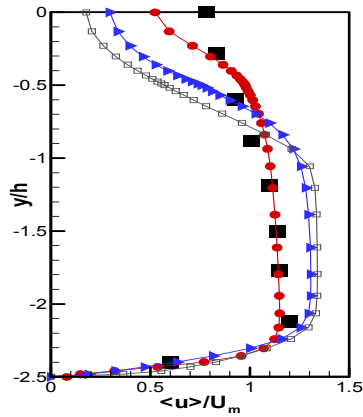
شکل ۱- طرح فیزیکی مساله



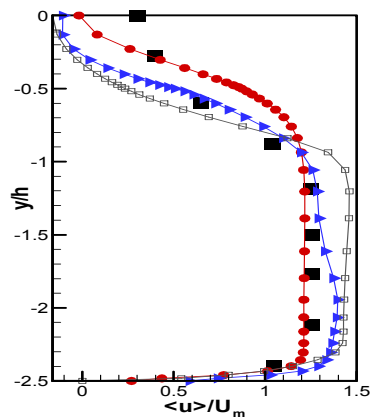
شکل ۲- شبکه بندی



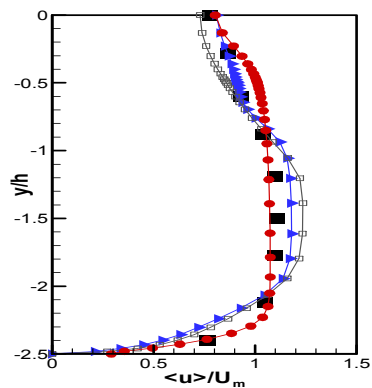
شکل ۳- خطوط جریان میدان متوسط سرعت (مدل LES)



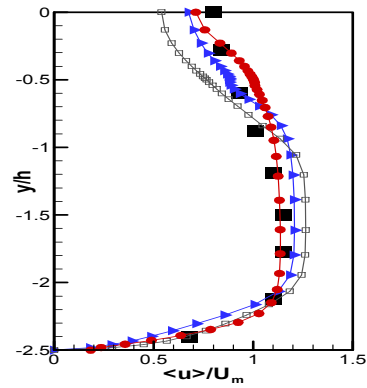
(ب)



(الف)

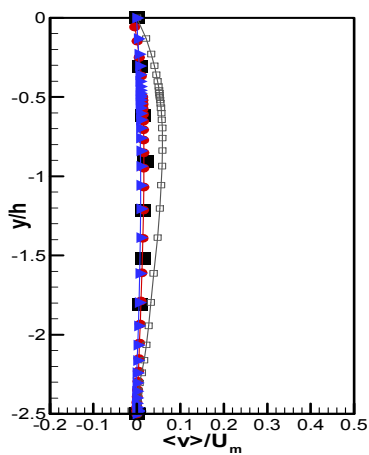


(د)

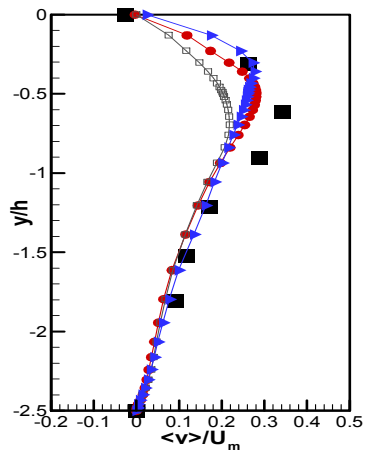


(ج)

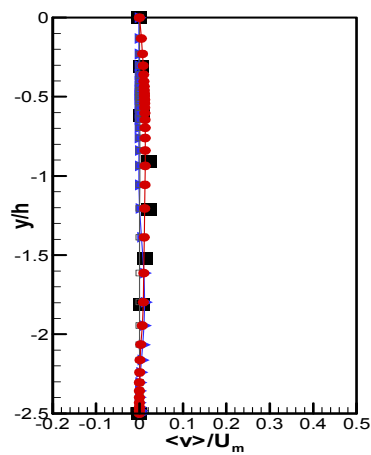
شکل ۴- پروفیل های سرعت متوسط در جهت جریان (■): Nakagawa et al. [1], -•- LES, ->- RSM, -□-: (k-ε) الف- x/h=1, ب- x/h=3.5, ج- x/h=6.0, د- x/h=8.5



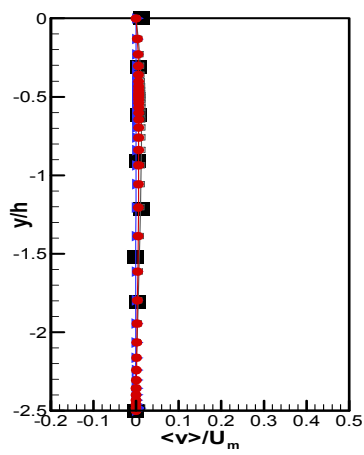
(ب)



(الف)

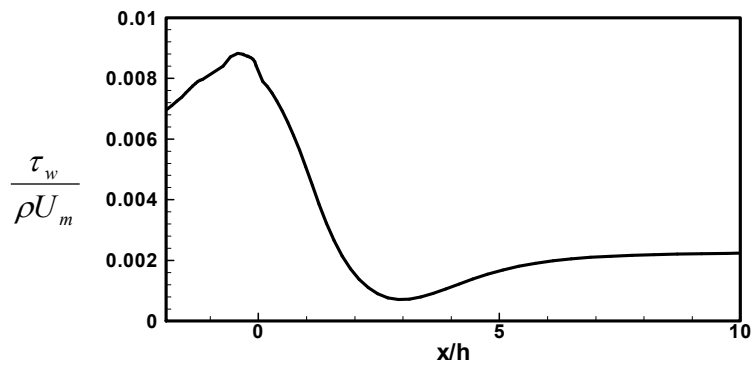


(د)



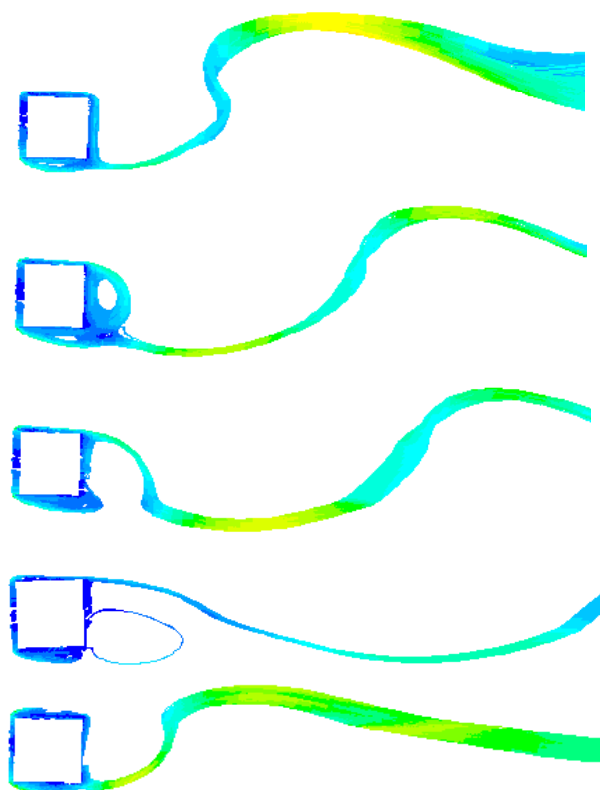
(ج)

شکل ۵- پروفیل های سرعت متوسط در جهت عمود بر جریان (■): Nakagawa et al. [1]، -•-: LES، ->: RSM، -□-: (k-ε)، الف- x/h=1، ب- x/h=3.5، ج- x/h=6.0، د- x/h=8.5



شکل ۶- توزیع تنش برشی متوسط بر روی دیواره کانال توسط مدل LES





شکل ۷- خطوط جریان در یک دوره تناوب

جدول ۱- مقایسه اعداد استروخال (St)

St	Re	
۰/۱۳	۳۰۰۰	ناکاگوا و همکاران (Nakagawa et al.) [۱]
۰/۱۰۶	۳۰۰۰	present

Surf and download all data from SID.ir: [www.SID.ir](http://www.SID.ir)

Translate via STRS.ir: [www.STRS.ir](http://www.STRS.ir)

Follow our scientific posts via our Blog: [www.sid.ir/blog](http://www.sid.ir/blog)

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: [www.sid.ir/workshop](http://www.sid.ir/workshop)