

تحریک لایه مرزی جریان مغشوش روی صفحه تخت با استفاده از مانع مربعی در حالت ناپایدار

محسن کهرم^۱، سید محمد جوادی^۲، داوود خدادادزاده^۳، سعید خاکپور^۴

دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

صندوق پستی ۱۱۱۱ - ۹۱۷۷۵

E-mail : kahrom_m@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق به مطالعه رفتار جریان آشفته روی صفحه تخت، که لایه مرزی آن با قرار دادن یک مانع مربعی تحریک شده است، پرداخته شده است. همچنین اثر تحریک لایه مرزی بر افزایش ضریب اصطکاک و انتقال حرارت صفحه در عدد رینولدز جریان 10^6 با توجه به رفتار گذرای جریان ناشی از تولید گردابه برای مانعی که در داخل لایه مرزی و در فواصل مختلف از صفحه قرار گرفته، بررسی شده است. برای شبیه سازی جریان مغشوش معادلات جریان در سیستم ۲ بعدی، کارتیزین با فرض جریان غیر قابل تراکم نوشته شده است. جهت مدل سازی ترمهای تنش رینولدز از مدل K-ε اصلاح شده و جهت بسط معادلات جریان از تقریب سه جمله ای QUICK و روش حجم محدود استفاده شده است. نتایج نشان می دهد با کاهش فاصله مانع از صفحه بدلیل افزایش تحریک زیر لایه آرام، ضریب اصطکاک و انتقال حرارت افزایش می یابد. همچنین با استفاده از معادلات در حالت گذرا، فرکانس رهایی گردابه ها و عدد اشتروهال برای فواصل مختلف مانع از صفحه محاسبه شده است. با افزایش فاصله مانع از صفحه، عدد اشتروهال افزایش یافته و به سمت $0/18$ (عدد اشتروهال مانع خارج از لایه مرزی) میل می کند که با نتایج تجربی موجود توافق خوبی نشان می دهد.

واژه های کلیدی: تحریک لایه مرزی - گردابه - روش QUICK - ضریب انتقال حرارت

مقدمه

کار مورد آزمایش و تحقیق قرار گرفته و نتایج مختلفی حاصل گردیده است. مجموعه این تحقیقات با نام تحریک لایه مرزی شناخته می شود. اساس تحریک لایه مرزی بهره گیری از پدیده های مختلف سیالاتی نظیر نقطه سکون، تشکیل گردابه، ایجاد جت درون لایه مرزی می باشد. یک روش عمده برای تحریک لایه مرزی استفاده از موانع خارجی داخل جریان می باشد که از آن جمله می توان به تیغه ها، پره ها، سیلندرها و اشاره کرد.

به دلیل کمبود نتایج در این زمینه، محققان تلاش گسترده ای برای مطالعه جریان توربولنس اطراف این اجسام با استفاده از روشهای مختلف از جمله شبیه سازی گردابه های

در بسیاری از عرصه های مهندسی و زندگی بشر نیاز به افزایش یا کاهش انتقال حرارت وجود دارد. در حالیکه با محدودیت افزایش یا کاهش سطح مواجه هستیم. ضریب انتقال حرارت به خواص و ویژگیهای حرکتی سیال بستگی دارد ولی تغییر خواص سیال همواره امکان پذیر نیست و تنها عامل مؤثر ویژگیهای سیال می باشد. وجود لزجت کناره سطح جامد باعث ایجاد یک لایه مرزی شده که یک لایه مقاوم در برابر انتقال حرارت ایجاد می کند. با تغییر الگوی جریان درون لایه مرزی می توان انتقال حرارت و ضریب اصطکاک را تغییر داد. روشهای متعددی برای این

¹ دانشیار

² دانشجوی دکتری

^{3,4} دانشجوی کارشناس ارشد

بررسی به نقش تیغه پشت مانع در کاهش ضریب درگ مانع و تغییر در زمان آزاد شدن گردابه‌ها اشاره شده است. در این پروژه با قرارگیری یک مانع (سیلندر مربعی) در فواصل مختلف از صفحه تخت، روند تغییرات جریان و اثر آن بر ضریب انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و فرکانس تولید و رهایی گردابه‌ها با استفاده از حل گذرا مورد مطالعه قرار گرفته است.

معادلات حاکم

در جریانهای مغشوش که تقریباً شامل بیشتر جریانهای موجود در طبیعت شامل می‌شوند یک رشته حرکات تصادفی سبب تغییرات نامنظم جریان می‌شوند. در این جریانها می‌توان مقدار لحظه‌ای مولفه‌های سرعت، دما و فشار را حاصل یک مقدار میانگین و یک مقدار نوسانی در نظر گرفت. بعنوان مثال برای پارامتر u می‌توان نوشت:

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

با جایگذاری این پارامترها در معادلات ناویر-استوکس و ساده سازی خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{D\bar{U}_i}{Dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\rho \partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_i} (v \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_i} - \overline{u'_i u'_j}) \quad (3)$$

$$\frac{D\bar{T}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_i} (\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial X_i} - \overline{u'_i \theta'}) \quad (4)$$

همچنین با توجه به استفاده از مدل دو معادله‌ای K-ε با اصلاح لاندنر-شارما، معادلات K و ε به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{D\bar{K}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[(v + \frac{v_i}{\sigma_k}) \frac{\partial \bar{K}}{\partial X_i} \right] + (-\overline{u'_i u'_j}) \left[\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} \right] - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{D\bar{\varepsilon}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[(v + \frac{v_i}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial X_i} \right] + C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\bar{\varepsilon}^2}{K} + C_{\varepsilon 1} f_1 \frac{\bar{\varepsilon}}{K} (-\overline{u'_i u'_j}) \left[\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} \right] + E \quad (6)$$

بطوریکه تعدادی از ضرایب و تعاریف این معادلات به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \quad (7)$$

بزرگ (LES) انجام داده اند. در برخی از تحقیقات سعی شده است با تغییر الگوی جریان در پشت موانع که معمولاً با تولید گردابه‌ها همراه می‌باشد، ضریب انتقال حرارت و یا ضریب درگ مانع و همچنین صفحه ای که مانع بر روی آن قرار دارد تغییر داده شود.

آن قرار دارد تغییر داده شود. D.K.Maiti و Bhattacharyya [۱] در سال ۲۰۰۴ جریان اطراف یک سیلندر مربعی که موازی با دیواره و در داخل لایه مرزی قرار گرفته، مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق جریان آرام (Re=۱۴۰۰) فرض شده و سیلندر در فواصل مختلف از صفحه واقع شده است. نتایج حاکی از کاهش عدد اشتروهال و افزایش نیروی درگ با کاهش فاصله مانع تا صفحه است.

در سال ۱۹۹۹ مطالعه دیگری بر روی سیلندر مربعی توسط گروه CFD2K Benchmark Challenge [۳] انجام شد که در آن سرعت، تنشهای رینولدز و فشار در پشت مانع دو بعدی شبیه سازی و در فواصل مختلف مانع از صفحه در رینولدز ۲۲۰۰۰ مورد بررسی واقع شده است. نتایج این گروه نشان می‌دهد که در فواصل دور گردابه‌های ایجاد شده پشت مانع حالت کاملاً نوسانی داشته و در فواصل نزدیک مانع تا صفحه این گردابه‌ها به حالت Stationary تشکیل می‌شوند.

از مطالعات دیگر انجام شده می‌توان به مطالعات دکتر سوهانکار [۵-۴-۲] اشاره نمود. او با استفاده از روش شبیه سازی گردابه‌های بزرگ (LES)، جریان اطراف استوانه دو بعدی و سه بعدی را شبیه سازی نموده و پارامترهای مختلف از جمله تاثیر عدد رینولدز بر ایجاد گردابه پشت سیلندر در مختصات دو بعدی و سه بعدی را مورد مطالعه قرار داده است. نتایج او نشان داد که تولید گردابه‌ها در رینولدز بزرگتر از ۳۰۰ در مختصات دو بعدی کاملاً متقارن (Symmetric) نیست ولی در مختصات سه بعدی خلاف این است. همچنین تاثیر نوع شبکه بندی، محدوده زمانی عدد اشتروهال و ضریب بالابری در رینولدز ۲۲۰۰۰ را مورد بررسی قرار داده است و با نتایج تجربی مقایسه کرده و نتایج خوبی حاصل شده است.

ناتالی بویسابرت [۶] اثر فاصله و طول تیغه در پشت یک مانع به شکل نیم استوانه را در داخل جریان در رینولدزهای پائین بر عدد اشتروهال مورد بررسی قرار داده است. در این

روش حل

برای تبدیل معادلات دیفرانسیلی حاکم به شکل انفصالی آن، از روش حجم محدود استفاده شده است. همچنین طرح تفاضل مرکزی برای جملات پخش و طرح تفاضلی آپویند به همراه روش quick برای جملات جابجایی استفاده گردیده‌اند. انفصال جملات زمانی نیز با استفاده از طرح تفاضلی پیشرو می‌باشد. حل نهایی مجموعه معادلات جبری بدست آمده روی شبکه جابجا شده غیر یکنواخت و با استفاده از روش TDMA و برای حل میدان فشار از روش اصلاح شده سیمپل استفاده شده است.

شرایط مرزی

یک صفحه تخت به طول ۱ متر به موازات جریان سیال و یک مقطع مستطیلی به ابعاد (۸×۸mm) در فاصله‌ای از لبه حمله که در آن $Re_x = 10^6$ است، قرار داده شده است. جریان هوا به موازات صفحه تخت و با سرعت $14m/s$ و درجه حرارت $20^\circ C$ موازات صفحه تخت در حرکت است. عدد رینولدز در لبه حمله ابتدای صفحه $Re_x = 8.4 * 10^5$ در نظر گرفته شده است. همچنین برای محاسبه سرعت در ورودی از پروفیل VonKarman و برای محاسبه دما از پروفیل مربوط به جریان مغشوش استفاده شده است. K و ε در ورودی به شکل زیر محاسبه شده است:

$$K_{(ly,1)} = \sum_{i=0}^{10} a_i \cdot \alpha^i \quad (25)$$

$$D_{(ly,1)} = 2v \left(\sum_{i=0}^q a_i \cdot \alpha^i \right) \times \frac{0.5}{\sqrt{(K_{(ly,1)} - Tiny)}} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{(ly,1)} = \sum_{i=0}^q a_i \cdot \alpha^i \quad (27)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - 2v \left(\sum_{i=0}^q a_i \cdot \alpha^i \right) \times \frac{0.5}{\sqrt{(K_{(ly,1)} - Tiny)}} \quad (28)$$

که در آن a_i مقادیر ثابت و $\alpha = \frac{y(j)}{\delta}$ می باشد و Tiny مقدار ثابت و بسیار کوچکی است.

$$-\overline{u'_i u'_j} = v_i \left(\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_i} \right) \quad (8)$$

$$-\overline{u'_i \theta'} = \frac{v_i}{Pr} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial X_i} \right) \quad (9)$$

$$v_i = C_\mu f_\mu \frac{K^2}{\bar{\varepsilon}} \quad (10)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - D \quad (11)$$

$$f_\mu = \text{Exp} \left[\frac{-3.4}{(1 + R_i/50)^2} \right] \quad (12)$$

$$f_1 = 1.0, \quad f_2 = 1.0 - 0.3 \text{Exp}[-R_i^2] \quad (13)$$

$$D = 2v \left(\frac{\partial \sqrt{K}}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial \sqrt{K}}{\partial X_i} \right) \quad (14)$$

$$E = 2vv_i \left(\frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial X_j \partial X_k} \right) \left(\frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial X_j \partial X_k} \right) \quad (15)$$

$$R_i = \frac{K^2}{v\bar{\varepsilon}} \quad (16)$$

جمله $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ در معادله مومنتوم و جمله $-\overline{\rho u'_i \theta'}$ در معادله انرژی به ترتیب به تنش رینولدز و شار گرمایی مغشوش شناخته شده‌اند. تنش برشی کل جریان مغشوش برآیند تنش برشی ناشی از لزجت سیال (τ_l) و تنش برشی ناشی از حرکت مغشوش سیال (τ_t) می‌باشد.

$$\tau = \tau_l + \tau_t \quad (17)$$

$$\tau_l = \mu \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \tau_t = -\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (18) \text{ و } (19)$$

همچنین شار کل گرمایی جریان مغشوش، مجموع شار گرمایی جریان پخش و شار گرمایی مغشوش می باشد.

$$q = q_l + q_t \quad (20)$$

$$q_l = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_t = -\rho C_p \overline{T'v'} \quad (21) \text{ و } (22)$$

بونسنیسیک پیشنهاد کرده است که تنش برشی مغشوش و شار گرمایی مغشوش به صورت زیر نوشته شود:

$$\tau_t = \rho \varepsilon_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\overline{\rho u'v'} \quad (23)$$

$$q_t = -\rho \varepsilon_H \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \rho C_p \overline{T'v'} \quad (24)$$

که ε_m و ε_H به ترتیب ضریب پخش مغشوش اندازه حرکت و ضریب پخش گرمای مغشوش می باشد.

طول صفحه پشت سیلندر ۶۵ سانتیمتر (شکل ۱) بوده، بنابراین تغییرات پارامترها در انتهای صفحه و در امتداد جریان، ناچیز در نظر گرفته شده است و می‌توان مشتقات تمامی پارامترها نسبت به x را صرفنظر نمود. ارتفاع میدان شبکه بندی شده حدود ۱۵ برابر پهنای مانع در نظر گرفته تا بتوان از تغییرات پارامترها در امتداد y روی مرز بالا نیز صرفنظر کرد.

نتایج

مقایسه ضخامت لایه مرزی سرعتی و گرمایی محاسبه شده از برنامه خطایی با پروفیل‌های موجود خطایی حدود ۵٪ را نشان می‌دهد. همچنین ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک بدست آمده از برنامه با پروفیل‌های تجربی موجود برای اعداد پرانتل بین ۰.۶ تا ۵۰ مقایسه گردیده که بیشترین خطا حدود ۱۰٪ بوده است.

$$h_x = 0.296(Re)^{4/5} \times (pr)^{1/3} \times \frac{k}{x} \quad (29)$$

$$C_{fx} = 0.0592 Re^{(-0.2)} \quad (30)$$

شکل ۱ نمای کلی هندسه مورد بررسی را نشان می‌دهد. شبکه بندی میدان حل در شکل ۲ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در اطراف مانع و صفحه تخت بدلیل وجود لایه مرزی و تغییرات شدید متغیرها شبکه بسیار ریز شده است. شکل ۳ و ۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک موضعی در طول صفحه را در حالتیکه مانع در فاصله ۱۵ میلیمتری قرار گرفته است، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود:

- در ابتدای مانع ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک موضعی به علت تشکیل جت زیر مانع افزایش ناگهانی می‌یابد. مقدار این افزایش با کاهش فاصله مانع از صفحه بدلیل تشکیل جت قویتر افزایش می‌یابد.

- در طول مانع به علت افزایش عدد رینولدز، شروع نقطه جدایش و افت فشار پشت مانع، ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک موضعی کاهش نسبی می‌یابند.

- تشکیل گردابه کوچک روی صفحه، بدلیل به هم ریختن کامل زیر لایه آرام سبب افزایش شدیدی در ضریب انتقال حرارت موضعی می‌شوند. همچنین موج فشاری و انقباض و انبساط خطوط جریان ناشی از رها شدن گردابه‌های پشت مانع بر افزایش ضریب انتقال حرارت بسیار

موثر می‌باشند. انبساط خطوط جریان بدلیل افزایش انتقال حرارت جابجایی در راستای عمود بر سطح سبب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. در چنین مناطقی بدلیل کاهش سرعت در راستای طول صفحه ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. از طرفی در نواحی با انقباض خطوط جریان، بدلیل افزایش سرعت موازی سطح (بدلیل ثابت بودن دبی عبوری از بین خطوط جریان) ضریب اصطکاک افزایش چشمگیری می‌یابد ولی ضریب انتقال حرارت در تقابل دو عامل تشکیل جت قویتر و کاهش انتقال حرارت جابجایی در راستای عمود بر سطح قرار می‌گیرد. اما بطور کل ضریب انتقال حرارت نسبت به صفحه تخت افزایش یافته ولی اثر آن در مقایسه با اثر گردابه بسیار کمتر می‌باشد.

شکل ۵ نحوه شکل گیری و رها شدن گردابه‌های پشت مانع مربعی (فاصله ۱۵ میلیمتر از صفحه تخت) را در فواصل زمانی مختلف در یک دوره زمانی نشان می‌دهد.

شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات ضریب انتقال حرارت و اصطکاک موضعی را در دوره زمانی نشان می‌دهد. با توجه به تولید رهایی گردابه‌ها به صورت پریودیک این پارامترها نیز نسبت به زمان به صورت پریودیک تغییر می‌کند.

شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب تغییرات ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک موضعی را نسبت به فاصله مانع از صفحه نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۸ ضریب انتقال حرارت با کاهش فاصله مانع تا صفحه به علت افزایش سرعت جت زیر مانع و خصوصا گردابه‌های کوچک ایجاد شده روی صفحه افزایش می‌یابد. همانطور که شکل ۹ نشان می‌دهد ضریب اصطکاک تحت تاثیر تغییرات شدید سرعت موازی سطح (بدلیل شکل گیری گردابه‌های روی سطح و انقباض و انبساط خطوط جریان ناشی از رها شدن گردابه‌های پشت مانع) دچار نوسانات شدید است. اما با افزایش فاصله مانع از سطح نوسانات کاهش یافته و با خروج مانع از لایه مرزی صفحه تخت منحنی به سمت منحنی صفحه تخت میل می‌کند.

بدلیل اهمیت ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک متوسط در ناحیه تحریک، روند تغییر این دو متغیر از $x=0.35m$ تا انتهای صفحه (نسبت به صفحه تخت) در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله مانع از صفحه طول ناحیه تحریک شده توسط مانع کاهش یافته تا به منحنی صفحه تخت

عدد اشتروهال جریان با افزایش فاصله مانع از صفحه افزایش یافته و به سمت عدد اشتروهال $St=0.139$ میل می‌کند.

مراجع

1. Bhattacharyya, S., Maiti, D. K., 'Shear flow past a square cylinder near a wall', Indian Institute of Technology - Kharagpur, 2004
2. Sohankar, A., 'Large eddy simulation of flow past a square cylinder', 2000
3. CFD2K Benchmark Challenge, 'Turbulent flow around a square cross-section cylinder in the proximity of a solid wall', CFD Society of Canada, NOV. 1999
4. Sohankar, A., 'simulation of three dimensional flow around a square cylinder at moderate Reynolds number', vol.2, 1999
5. Sohankar, A., 'Numerical simulation of flow past a square cylinder', ASME, 1999
6. Boisaubert, N., 'effect of a splitter plate on the near wake development of a semi circular cylinder', 1997
7. Durao, D. F. G., Heitor, M. V. and Pereira, J. G. F., 'Measurements of turbulent and periodic flows around a square cylinder', Experiments in fluids, Vol.6, 1988, pp.298-304

جدول ۱- مقایسه عدد اشتروهال برای فواصل

مختلف مانع

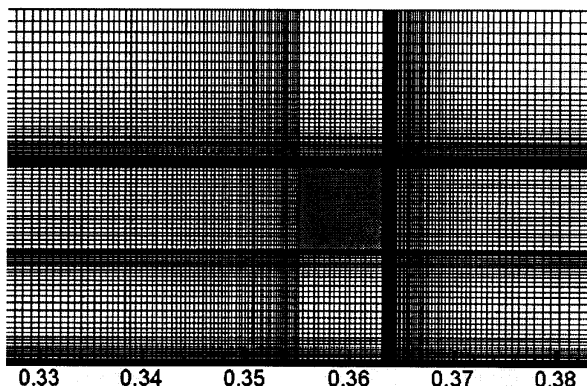
عدد اشتروهال	فاصله مانع از صفحه D(cm)
0.076	0.2
0.08	0.8
0.094	2
0.1	4
0.105	5.14
0.12	8.53
0.135	نتیجه آزمایش [7]

منطبق گردد. برای کمترین فاصله مانع از صفحه ($D=0.2\text{cm}$) طول ناحیه تحریک حدود 15cm و ضریب انتقال حرارت متوسط آن 6.5 برابر صفحه تخت محاسبه شده است. طول این ناحیه برای مانع در فاصله $D=1.2\text{cm}$ تا 5cm و مقدار ضریب انتقال متوسط آن تا 4.5 برابر صفحه تخت کاهش یافته است. پس از این فاصله روند کاهش اثر تحریک به شدت افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد ضریب اصطکاک متوسط نیز کاهش چشمگیری نسبت به صفحه تخت دارد. هر چند که با افزایش فاصله مانع از صفحه به سمت ضریب اصطکاک متوسط صفحه تخت میل می‌کند.

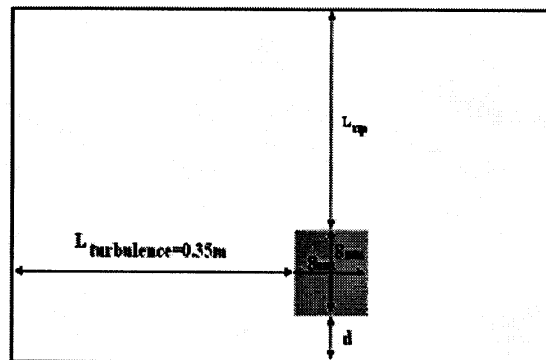
شکل ۱۲ تغییرات عدد اشتروهال نسبت به فاصله مانع تا صفحه را نشان می‌دهد. با افزایش فاصله مانع از صفحه عدد اشتروهال افزایش یافته و به سمت عدد اشتروهال مانع مربعی در غیاب صفحه ($St=0.139$) میل می‌کند. قرار گرفتن صفحه تخت زیر مانع سبب کاهش سرعت جریان اصلی (عامل اصلی جدا شدن گردابه‌های اطراف مانع) و در نتیجه کاهش عدد اشتروهال شده است. در جدول ۱ روند تغییرات عدد اشتروهال برای فواصل مختلف مانع از صفحه آورده شده است.

جمع بندی

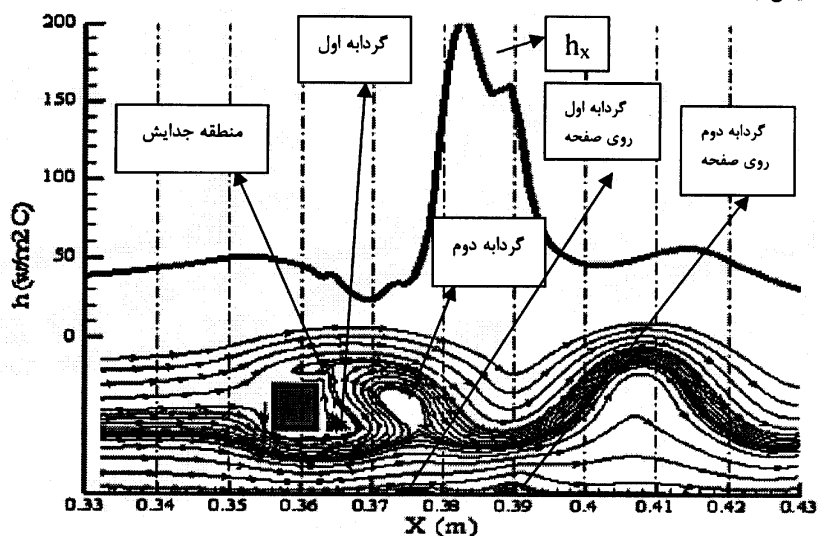
در این مقاله اثر تحریک لایه مرزی توسط مانع مربعی مطالعه شده است. نتایج بدست آمده در مقایسه با صفحه تخت نشان می‌دهد با افزایش فاصله مانع از صفحه تخت ضریب انتقال حرارت متوسط و طول ناحیه تحریک به شدت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله مانع از صفحه تخت ضریب انتقال حرارت و اصطکاک به سمت ضریب انتقال حرارت و اصطکاک صفحه تخت میل می‌کند. گردابه‌های ایجاد شده روی صفحه تخت بدلیل برهم زنی جریان در زیر لایه آرام سبب افزایش ناگهانی ضریب انتقال حرارت می‌شوند. رها شدن گردابه‌ها در پشت مانع سبب ایجاد یک موج فشاری در پشت مانع و انبساط و انقباض مکرر خطوط جریان می‌شوند. انبساط خطوط جریان بدلیل افزایش انتقال حرارت جابجایی در راستای عمود بر صفحه، ضریب انتقال حرارت را افزایش چشمگیری می‌دهد.



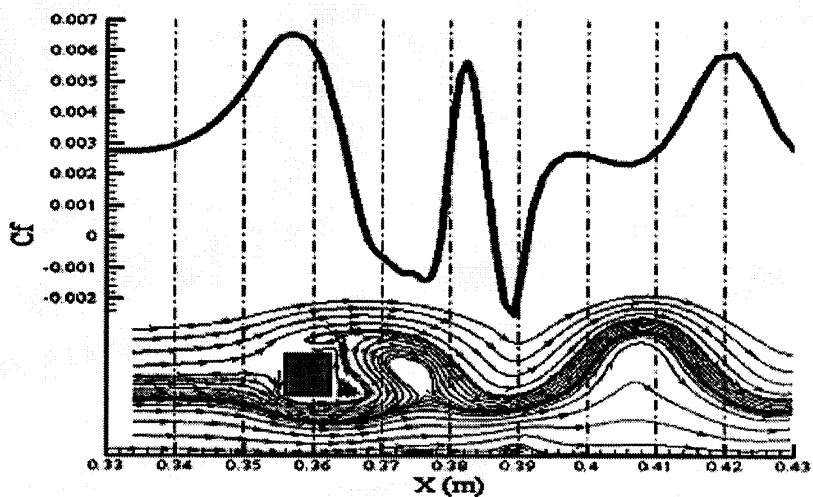
شکل ۲- نمایی از شبکه بندی در روی صفحه تخت با وجود سیلندر مربعی و میدان حل جریان



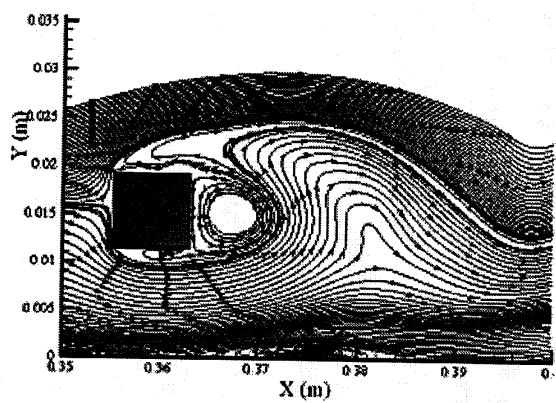
شکل ۱- هندسه و نمای کلی میدان حل (مقیاس ابعاد سیلندر ۱۰ برابر مقیاس ابعاد صفحه است).



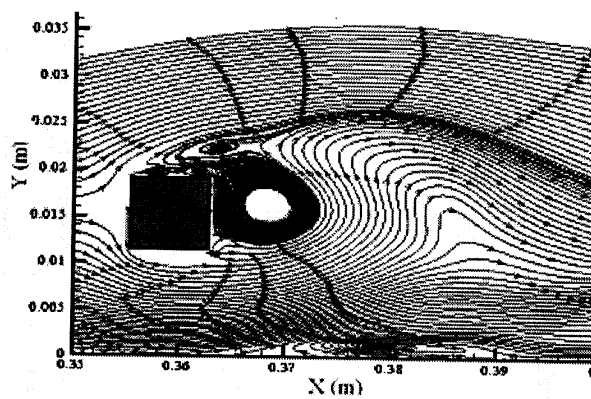
شکل ۳- تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی در طول صفحه در یک زمان خاص (فاصله مانع تا صفحه ۱۵ میلیمتر است)



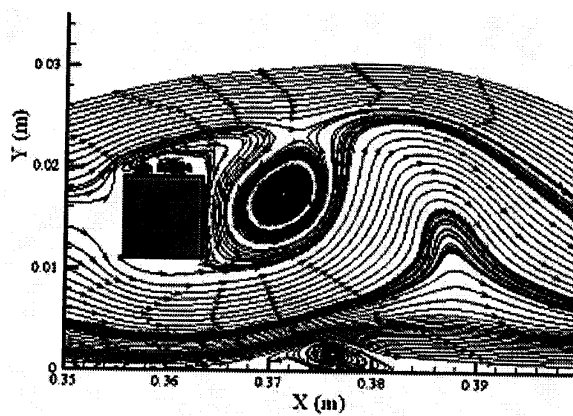
شکل ۴- تغییرات ضریب اصطکاک موضعی در طول صفحه در یک زمان خاص (فاصله مانع تا صفحه ۱۵ میلیمتر است)



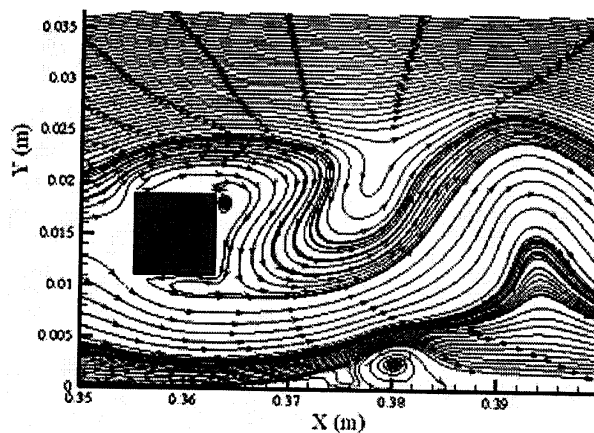
(a)



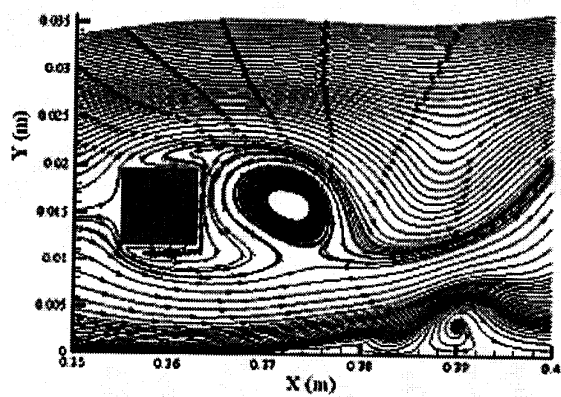
(b)



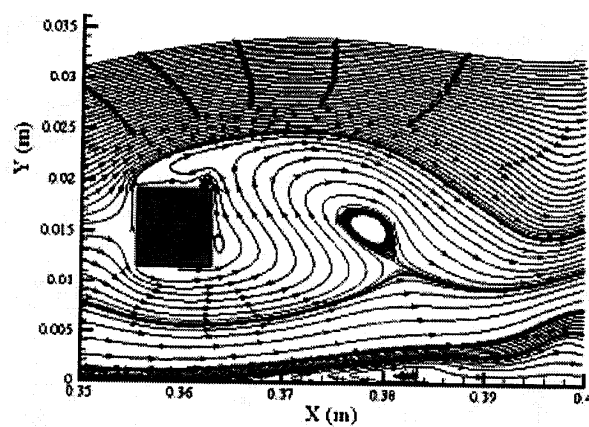
(c)



(d)



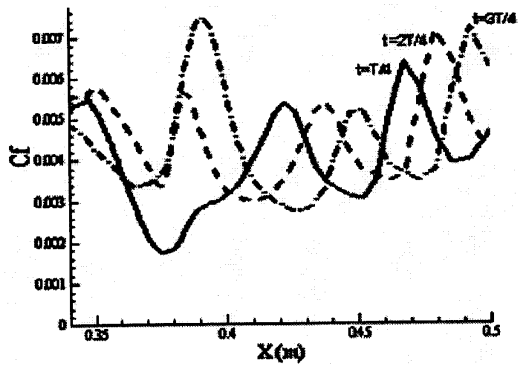
(e)



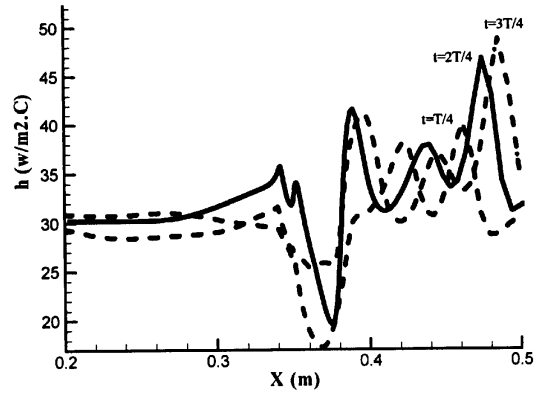
(f)

شکل ۵- روند شکل‌گیری گردابه‌های پشت مانع مربعی با ابعاد 8×8 و در فاصله 11 mm از صفحه پایین در فاصله‌های زمانی

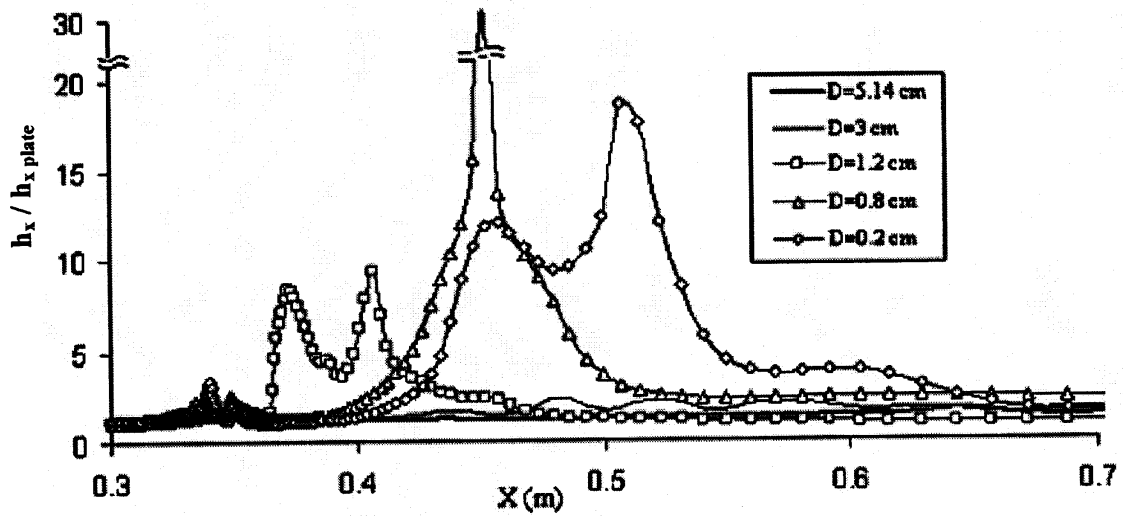
$T/9$ (a), $2T/9$ (b), $3T/9$ (c), $4T/9$ (d), $5T/9$ (e), $7T/9$ (f), $9T/9$ (f)



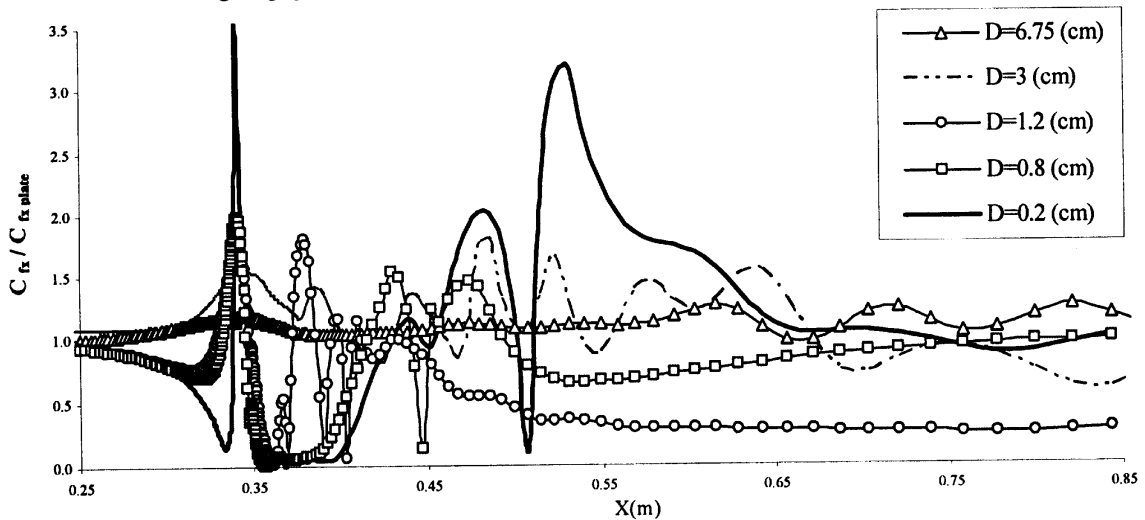
شکل ۷- تغییرات ضریب اصطکاک موضعی نسبت به زمان



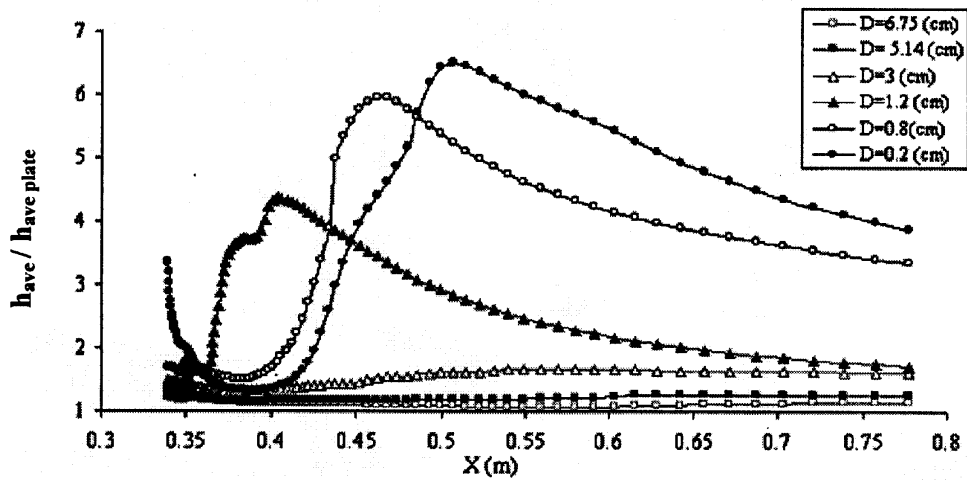
شکل ۶- تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی نسبت به زمان



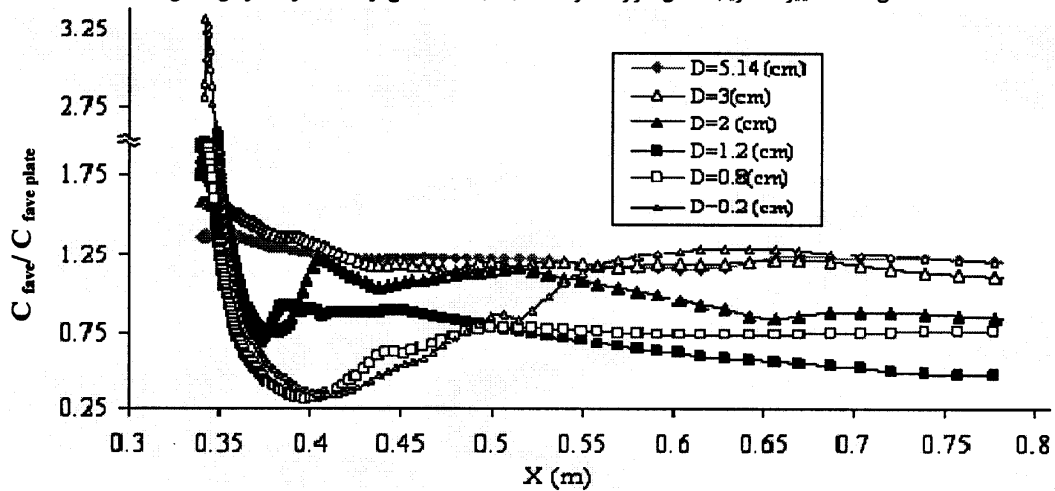
شکل ۸- تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی نسبت به فاصله مانع از صفحه در یک زمان خاص



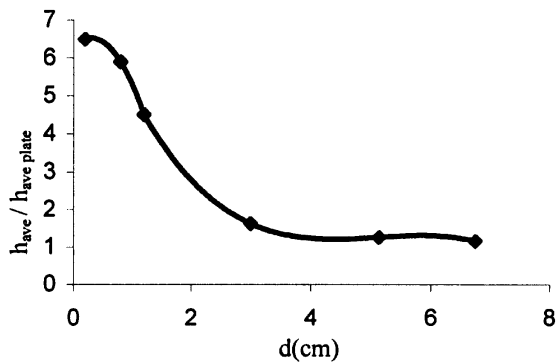
شکل ۹- تغییرات ضریب اصطکاک موضعی نسبت به فاصله مانع از صفحه در یک زمان خاص



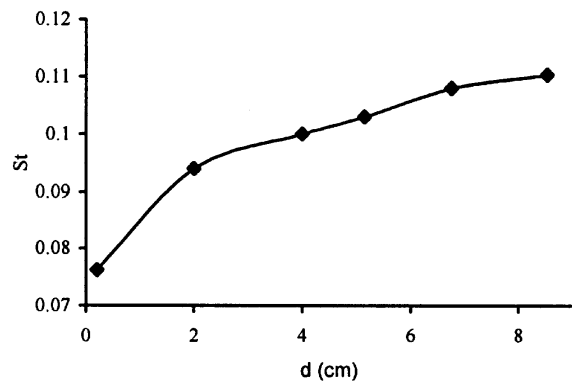
شکل ۱۰ - تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط نسبت به فاصله مانع از صفحه در یک زمان خاص



شکل ۱۱ - تغییرات ضریب اصطکاک متوسط نسبت به فاصله مانع از صفحه



شکل ۱۳ - تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط در حالت با مانع به صفحه تخت بدون مانع بر حسب فاصله عمودی مانع از صفحه



شکل ۱۲ - تغییرات عدد استروهل نسبت به فاصله مانع از صفحه