

## اثر نسبت ابعادی یک چهار گوش بر عدد اشتروهال و تاثیر آن در تحریک ضریب انتقال گرما از صفحه تخت مجاور آن

محسن کهرم\*، علی فرهد\*\* و داوود خدادادزاده\*\*\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۸۵/۲/۹ - دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۱۱/۲۲)

**چکیده** - یک مانع با مقطع چهار گوش در مسیر جریان آزاد قرار داده می‌شود و تاثیر نسبت ابعادی چهار گوش در شکل‌گیری و تعداد گردابه‌های رها شده از انتهای مانع بر حسب تغییرات نسبت ابعادی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. سپس مقطع مستطیلی به سمت یک صفحه تخت که با جریان اصلی در حال تبادل گرماسر حرکت داده می‌شود و ضمن نزدیک شدن به لایه مرزی مغشوش ( $Re_x = 10^6$ ) روی صفحه اثر نسبت ابعادی و فاصله از صفحه تخت بر ضریب انتقال گرما از صفحه تخت و تاثیر لایه مرزی بر شکل‌گیری گردابه‌ها و عدد اشتروهال بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان مغشوش از مدل  $k-\varepsilon$  اصلاح شده و گسسته‌سازی معادلات جریان از تقریب سه جمله‌ای کوئیک و روش حجم محدود استفاده شده است. عدد رینولدز برای چهار گوش با استفاده از مشخصه طولی چهار گوش (حدود ۵۰۰۰)، معادلات جریان در شکل گذرا و در دستگاه مختصات کارتزین دو بعدی، تراکم‌ناپذیر بررسی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات عدد اشتروهال تا زمانی که جسم خارج از لایه مرزی قرار دارد به صورت پله‌ای تابعی از تغییرات نسبت ابعادی جسم است. با نزدیک شدن مقطع به دیواره، عدد اشتروهال به سمت صفر میل کرده و خاصیت رهایی تناوبی گردابه به حضور دائمی یک گردابه و فقط با نوسانات ابعادی، تبدیل می‌شود. ملاحظه می‌شود که نزدیک شدن مقطع به صفحه تخت موجب افزایش ضریب انتقال گرمای متوسط تا ۵۰٪ و افزایش ضریب انتقال گرمای موضعی تا ۲۰۰٪ می‌شود.

واژگان کلیدی: مانع مستطیلی، نسبت ابعادی، عدد اشتروهال، رهایی گردابه، روش کوئیک

# Effect of Square Rod Aspect Ratio on Vortex Shedding Downstream the Rod and Heat Transfer Enhancement from the Neighboring Flat Plate

M. Kahrom, A. Farahbode, and D. Khodadadzadeh

Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashad

**Abstract:** A rectangular rod is placed in a flow field flowing parallel to a flat plate. Effect of chord-thickness ratio of rectangular rod on developing vortex shedding downstream to the rod is studied. Then, for each one of the aspect ratios, the distance of the rod from the neighboring flat plate is reduced until the rod sticks to the flat plate. In each case, the effect of the flat plate boundary layer on Strouhal number and the contrary effect of the boundary layer on vortex shedding from the rectangular rod are studied. Results show that as the rectangular rod enters into the flat plate boundary layer, vortex generation from the closest side of the rod reduces, thereby reducing the Strouhal number as well. Finally, when the rectangular rod sticks to the flat plate, a stationary wake forms downstream the rod and sticks to the flat plate. Meanwhile, the boundary layer over the flat plate is disturbed effectively and heat transfer coefficient from the flat plate is enhanced by an average of 50% and up to 200% in some places, locally.

**Keywords:** Rectangular rod, Vortex shedding, Strouhal number, Heat transfer enhancement, Quick scheme.

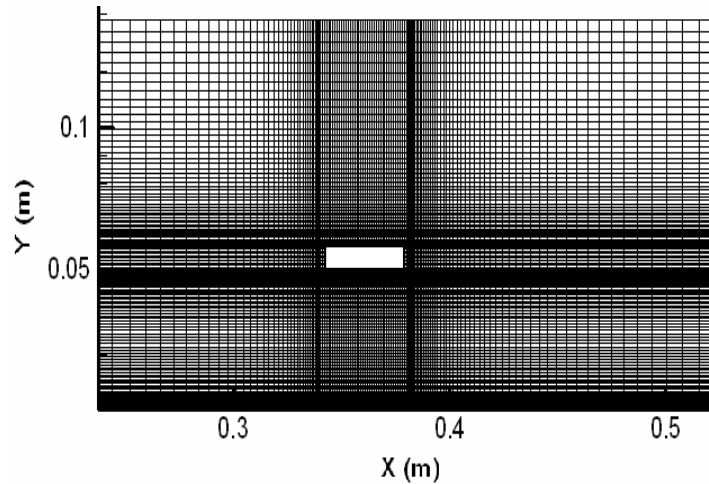
## ۱- مقدمه

یکی از روشهای موثر تحریک لایه مرزی مغشوش بر روی یک دیواره، استفاده از یک جسم خارجی در محدوده لایه مرزی است. در این روش یک چهار گوش یا شکلهای دیگر را در درون لایه مرزی قرار می دهند. جریان پس از رسیدن به مانع و برخورد با آن ابتدا یک نقطه سکون تشکیل می دهد و در ادامه مسیر خود از دو طرف مانع می گذرد، شکل (۱). قسمت هدایت شده به مجرای میان مانع و صفحه تخت، به صورت یک جت لایه مرزی روی صفحه تخت را تحت تاثیر قرار می دهد. سرعت این جت تا دو برابر جریان برخوردی به مانع را تشکیل می دهد و در شستشوی لایه مرزی بسیار موثر است. قسمت دیگر که به سمت دورتر جسم از صفحه تخت حرکت کرده است، با توجه به طول مانع ابتدا منطقه جدایش روی مانع و سپس تعدادی گردابه روی دیواره مانع تشکیل می دهد و بالاخره در ادامه راه خود در پشت مانع تشکیل یک گردابه می دهد. تعداد گردابه های رها شده از پشت جسم تابع طول جسم نیز هستند. این گردابه به نوبه خود در هم زنی و تحریک لایه مرزی پس از جسم موثر است. به طور خلاصه در چنین فرایندی در بالادست مانع یک نقطه سکون، در زیر مانع در حد فاصل

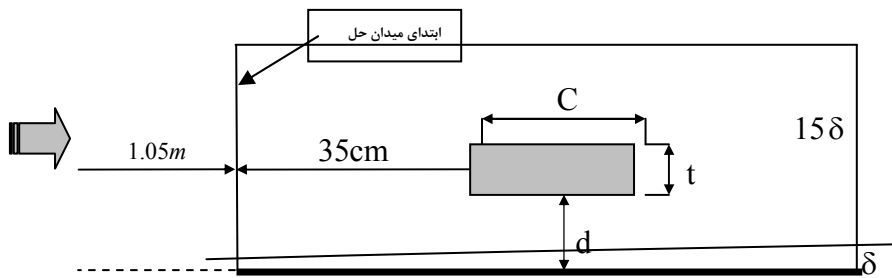
صفحه تخت و مانع یک جت و در پایین دست مانع یک منطقه ویک تشکیل می شود. هر یک از این عوامل به شکل خاصی در تغییر رفتار لایه مرزی موثر هستند.

برای یک مانع چهارگوش نسبت ابعادی مانع در شکل گیری گردابه های پشت نقش زیادی خواهد داشت. تحقیقات زیادی به صورت آزمایشگاهی و به کار بستن روشهای عددی چگونگی اثر نسبت ابعادی بر عدد اشتروهال وجود دارد. بسیاری از نتایج نشان می دهند که در نتیجه انجام پرش و سپس باز چسب لایه مرزی در لبه آغازین مانع، و در ادامه روی بدنه مانع، گردابه هایی تشکیل می شوند که بر روی دیواره حرکت کرده به پشت مانع راه می یابند. طول منطقه پرش تابع اندازه ضلع رو در روی مانع با جریان و تعداد گردابه ها تابع طول مانع در امتداد جریان است. این هر دو پدیده بر عدد اشتروهال در دنباله مانع موثر هستند.

ناکامورا [۱]، جریان در اطراف یک مانع مستطیلی (شکل ۲) را بررسی می کند. در این تحقیق، که در  $Re_c = 1000$  انجام شده است نشان داده می شود که عدد اشتروهال بر مبنای طول با افزایش نسبت طول به ضخامت،  $c/t$ ، به صورت پله ای افزایش می یابد. برای صفحات با نسبت  $3.2 < \frac{c}{t} < 7.6$  لایه برشی سیال



شکل ۱- نمایش نمونه‌ای از شبکه بندی فضای محاسباتی اطراف چهارگوش و روی صفحه تخت



شکل ۲- مشخصه‌های هندسی و میدان حل جریان

آهایا و آکاجیما [۳ و ۴]، به تغییرات مشابه عدد اشتروهل در عدد رینولدز  $1000$  و برای موانع با نسبت ابعادی  $[3-9] = \left[\frac{C}{t}\right]$  رسیدند. اما برای نسبت‌های بزرگتر حلقه فیدبک به اندازه کافی قوی نیست تا رها شدن گردابه‌ها را کنترل کند و در نتیجه به یک فرکانس مشخص دست نمی‌یابند.

ولش [۵]، در رینولدزهای بالا ( $Re_C = 15000 - 30000$ ) و میلز [۶]، برای  $Re_C = 9000$  به این نتیجه رسیدند که به جز موانع خیلی کوتاه ( $\frac{C}{t} = 3$ ) حلقه فیدبک به اندازه کافی قوی نیست تا رها شدن گردابه‌ها در لبه حمله را کنترل کند و بنابراین تغییرات پله‌ای مشاهده نمی‌شود.

در تحقیقاتی که تامسون و هوریگان [۷]، [۱۹۹۸] در عدد رینولدز  $400$  انجام دادند، نشان دادند که موانع مستطیلی با نسبت ابعادی  $3-10 = \frac{C}{t}$  به فرکانس‌های خاصی دست

در لبه حمله به طور مستقیم لبه پشتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد که این عمل منجر به ضربه فشاری در لبه پشتی می‌شود و لایه برشی سیال در لبه حمله را کنترل می‌کند.

میلز [۲] به این نتیجه رسید که برای موانعی که نسبت بزرگتر از  $\frac{C}{t} = 8$  لایه برشی به طور مستقیم لبه پشتی را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد، بلکه گردابه‌هایی در لبه حمله به وجود می‌آید که پس از جابه‌جا شدن به سمت پایین دست، لبه پشتی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. این عمل منجر به تولید امواج فشاری در پشت مانع می‌شود که آثار آن به بالا دست منتقل شده و رها شدن گردابه‌ها در لبه حمله را کنترل می‌کنند (حلقه فیدبک). در توالی این اثر، این امواج رها شدن گردابه‌های دوم و سوم و غیره را نیز کنترل می‌کنند. در این گزارش نیز تغییرات پله‌ای عدد اشتروهل مشاهده شده است.

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

$$\frac{D\bar{U}_i}{DX_i} = 0. \quad (1)$$

$$\frac{D\bar{U}_i}{Dt} = -\frac{\partial \hat{p}}{\rho \partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_i} (v \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_i} - \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

در این تحقیق از مدل رینولدز پایین  $k-\varepsilon$  اصلاح شده لاندرو-شارما استفاده می شود که تا روی دیواره ها حل می شود و نیازی به استفاده از قانون کنار دیوار ندارد. این مدل برای جریانهای جدا شده و جریانهای به شدت مغشوش نتایج خوبی به دست می دهد، [10]:

$$\frac{D\bar{k}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[ (v + \frac{v_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \bar{k}}{\partial X_i} \right] + (-\overline{u'_i u'_j}) \left[ \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} \right] - \varepsilon \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\bar{\varepsilon}}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial X_i} \left[ (v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial X_i} \right] \\ & + C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\bar{\varepsilon}^2}{k} + C_{\varepsilon 1} f_1 \frac{\bar{\varepsilon}}{k} (-\overline{u'_i u'_j}) \left[ \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} \right] + E \end{aligned} \quad (4)$$

به طوریکه تعدادی از ضرایب و تعاریف این معادلات به صورت زیر می باشد.

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \quad (5)$$

$$-\overline{u'_i u'_j} = v_t \left( \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_i} + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} \right) \quad (6)$$

$$v_t = C_\mu f_\mu \frac{K^2}{\bar{\varepsilon}} \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - D \quad (8)$$

$$f_\mu = \text{Exp} \left[ \frac{-3.4}{(1 + R_t/50)^2} \right], \quad f_1 = 1.0, \quad f_2 = 1.0 - 0.3 \text{Exp}[-R_t^2] \quad (9)$$

$$D = 2v \left( \frac{\partial \sqrt{K}}{\partial X_i} \right)^2 \quad (10)$$

$$E = 2vv_t \left( \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial X_j \partial X_k} \right)^2 \quad (11)$$

$$R_t = \frac{K^2}{v\bar{\varepsilon}} \quad (12)$$

تمام متغیرهای به کار رفته در این معادلات در جدول (1) معرفی شده اند. جمله  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  در معادله مومنتوم تنش مغشوش رینولدز است. تنش برشی کل جریان مغشوش برآیند تنش برشی ناشی از لزجت سیال ( $\tau_1$ ) و تنش برشی ناشی از حرکت

می یابند و تغییرات پله ای برای عدد اشتروهاال را مشاهده می نمایند.

در آزمایشی که میلز [8]، در یک تونل آب و برای  $Re_C = 490$  برای مانع چهارگوش انجام دادند، تغییرات پله ای عدد اشتروهاال برای موانع  $10-6 = \frac{C}{t}$  را اندازه گیری و ثبت کرد.

اتاچاترایا و همکاران [9]، جریان اطراف یک مقطع مربعی که موازی با دیواره و در داخل لایه مرزی قرار گرفته را مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق، جریان آرام ( $Re = 1400$ ) فرض شده و سیلندر در فواصل مختلف از صفحه واقع شده است. نتایج حاکی از کاهش عدد اشتروهاال و افزایش نیروی درگ با کاهش فاصله مانع تا صفحه است.

در مقاله حاضر یک مانع مستطیلی در مسیر جریان آزاد قرار داده می شود و تاثير نسبت ابعادی ( $C/t$ ) چهار گوش و همچنین فاصله آن از سطح صفحه تخت در شکل گیری و تعداد گردابه های رها شده از انتهای مانع مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. برای شبیه سازی جریان مغشوش از مدل  $k-\varepsilon$  اصلاح شده و گسسته سازی معادلات جریان از تقریب سه جمله ای کوئیک و روش حجم محدود استفاده شده است. با توجه به نوع پدیده و عدد رینولدز چهارگوش (حدود  $Re_C = 5000$ )، معادلات جریان در شکل گذرا (تابع زمان) و در دستگاه مختصات کارتزین دوبعدی، غیر قابل تراکم بررسی شده اند.  $Re_C$  تابع طول چهارگوش و با مقادیر متفاوت در این تحقیق استفاده می شود. سپس مقطع مستطیلی به سمت صفحه تخت که با جریان اصلی در حال تبادل گرما است حرکت داده می شود و اثر فاصله از صفحه تخت و نسبت  $C/t$  بر ضریب انتقال گرما از صفحه تخت و تاثير لایه مرزی بر شکل گیری گردابه ها و مقدار عدد اشتروهاال بررسی می شود.

## ۲ - معادلات حاکم

در جریانهای مغشوش می توان مقدار لحظه ای مولفه های سرعت و فشار را حاصل یک مقدار میانگین و یک مقدار

جدول ۱- تعریف نشانه‌ها

$\tau_l, \tau_t$	تنش برشی آرام، مغشوش	$C, t$	طول و عرض چهارگوش
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}$	ضرایب ثابت و ضرایب تخفیف	$\bar{U}$	سرعت متوسط
$f_1, f_2$	مدل لاندر- شارما [11]	$u', v', u'_j$	مولفه های سرعت لحظه ای
$D$	مشتق کامل، یا معادله (۱۰)	$-\rho u'_i u'_j$	مولفه های تنش رینولدز
$\nu, \nu_t$	لزجت سینماتیکی آرام، مغشوش	$k$	انرژی جنبشی مغشوش
$x$	فاصله از لبه حمله صفحه تخت	$\varepsilon$	اضمحلال مغشوش بودن
$X$	فاصله از لبه صفحه تخت در فضای محاسباتی	$f$	فرکانس رهایی گردابه ها
$Re_x$	رینولدز روی صفحه تخت	$\delta$	روی شکل (۲) تعریف شده‌اند
$Re_c$	رینولدز چهارگوش	$C, t, d, x$	
$R_t = \frac{u_\tau y^+}{\nu}$	رینولدز مغشوش بودن کنار دیواره [11]		

از روش حجم محدود استفاده شده است. انفصال جمله‌های جابه‌جایی و پخش با استفاده از طرح کوئیک که از یک درونیابی سه نقطه‌ای درجه دوم تعدیل شده بالا دست برای محاسبه مقادیر روی سطوح حجم کنترلی استفاده می‌کند، انجام شده است. مقادیر جرم، ممتوم، انرژی و همچنین مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  روی هر سطح، از یک تابع درجه دوم که بر دو گره همسایه آن سطح می‌گذرد و به علاوه یک گره در بالادست به دست می‌آید، [۱۴]. انفصال جمله‌های زمانی با استفاده از طرح تفاضلی پیشرو به دست آمده اند.

حل نهایی مجموعه معادلات جبری روی شبکه جابه‌جا شده نایکنواخت با استفاده از روش TDMA و برای حل میدان فشار از روش اصلاح شده سیمپلک استفاده شده است. این برنامه توسط نویسندگان این مقاله طراحی و نوشته شده است. میدان حل با استفاده از شبکه بندی متعامد نایکنواخت با حدود  $130 \times 180$  گره تعریف شده است. این تعداد گره با جابه‌جا شدن چهارگوش، اندازه چهارگوش و نزدیکی آن به صفحه تخت تغییر می‌کند. اندازه شبکه بر روی صفحه تخت و اطراف چهارگوش، که جریان سیال دارای پیچیدگی و تغییرات بیشتری است، با اندازه‌های ریزتر در نظر گرفته شده است. شکل (۱) یک نمونه از چگونگی گسترش شبکه بندی از روی سطح

مغشوش سیال ( $\tau_t$ ) است. بدیهی است هر کجا که شدت مغشوش بودن ناچیز باشد، سهم تنش برشی مغشوش و اثر حل معادلات مغشوش نیز به سمت صفر میل خواهد کرد.

$$\tau = \tau_l + \tau_t \quad (13)$$

$$\tau_l = \mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \quad (14)$$

$$\tau_t = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (15)$$

بوزینسک [۱۱] پیشنهاد کرده است که تنش برشی مغشوش به صورت زیر نوشته شود:

$$\tau_t = \rho \varepsilon_m \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} = -\rho \overline{u'v'} \quad (16)$$

که  $\varepsilon_m$  ضریب پخش مغشوش برای اندازه حرکت است [۱۱-۱۳].

عدد اشتروهل نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$St_c = \frac{fC}{U} \quad (17)$$

که  $f$  فرکانس رهایی گردابه‌ها،  $C$  طول مانع و  $\bar{U}$  سرعت متوسط جریان سیال است.  $St_c$  عدد اشتروهل بر مبنای طول چهارگوش تعریف شده است.

### ۳- روش حل - صحت سنجی مدل

برای تبدیل معادلات دیفرانسیلی حاکم به شکل انفصالی آن،

$$D(Iy,1) = 2v \left( \sum_{i=0}^q a_i \cdot \alpha^i \right) \times \frac{0.5}{\sqrt{(k(Iy,1) - \text{Tiny})}} \quad (21)$$

$$\varepsilon(Iy,1) = \sum_{i=0}^q a_i \cdot \alpha^i \quad (22)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - 2v \left( \sum_{i=0}^q a_i \cdot \alpha^i \right) \times \frac{0.5}{\sqrt{(k(Iy,1) - \text{Tiny})}} \quad (23)$$

در این معادلات  $a_i$  مقادیر ثابت و  $a = \frac{v(j)}{\delta}$  است و  $\text{Tiny}$  مقدار ثابت و بسیار کوچکی است که از بینهایت شدن کسر جلوگیری می‌کند. پس از مانع، صفحه تخت تا ۶۵ سانتیمتر ادامه می‌یابد تا تاثیر شرایط مرزی انتهایی صفحه بر روی تحول اطراف مانع کاهش یابد. بنابراین تغییرات پارامترها در انتهای صفحه و در امتداد جریان، ناچیز در نظر گرفته می‌شود و می‌توان از مشتقات تمامی پارامترها نسبت به  $x$  را در انتهای صفحه تخت صرف‌نظر کرد. ارتفاع فضای محاسباتی از سطح صفحه تخت حدود ۱۵ برابر ارتفاع مانع در نظر گرفته می‌شود تا بتوان اثر متقابل مانع و متغیرهای سیالی لبه بالایی جریان بر روی یکدیگر، به حداقل کاهش یابد.

## ۵ - نتایج

با توجه به اینکه معادلات جریان تابع زمان و گذرا هستند، مدت زمان لازم برای حل تا هنگامی که تفاوت مشخصات تکراری و دوره‌ای شود بسیار زیاد است. در شکل (۵) تغییرات فشار محلی در یک نقطه در پایین دست مانع برای حالت  $c/t = 2$  با تغییر زمان رسم شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات مشخصات جریان مثلا  $c_p$  جریان پس از زمان معینی به حالت دوره تکراری یکنواخت می‌رسد. چنین موقعیتی در تمام حالات این تحقیق برای بررسی نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۵-۱- عدد اشتروهال

تغییرات عدد اشتروهال بر مبنای طول با افزایش نسبت  $c/t$  در فاصله ۵۰ میلیمتری از صفحه تخت در شکل (۶) نشان داده شده است. همانند تحقیقات انجام شده در مرجع [۸]، مشاهده می‌شود که موانع با نسبت ابعادی  $c/t = [4,5]$  از لحاظ رهایی

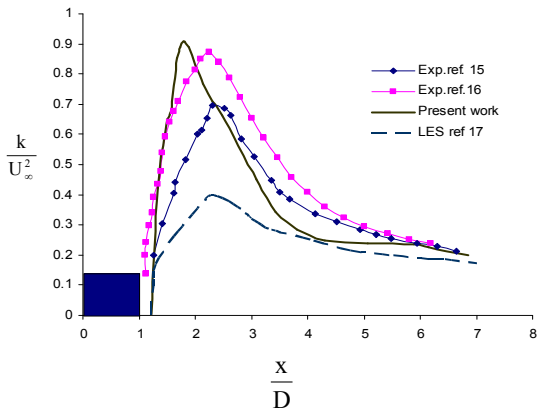
صفحه تخت تا اطراف مانع و سپس به تمامی فضای محاسباتی را نشان می‌دهد.

برای صحت سنجی برنامه رایانه‌ای، توزیع سرعت متوسط و توزیع انرژی جنبشی مغشوش  $k$  در اطراف یک مقطع مربعی از نتایج این برنامه با دو دسته نتیجه‌های آزمایشگاهی و یک دسته نتیجه از مدل LES مقایسه شده‌اند، شکل‌های (۳) و (۴). در هردو مقایسه روند تغییرات  $\bar{U}$  و  $k$  برای کد رایانه‌ای به نتایج آزمایشگاهی و LES منطبق است و رفتار مشابه دارند. در پیش بینی سرعت متوسط دقت LES دارای دقت بیشتر و در پیش بینی  $k$  کد رایانه‌ای این تحقیق دقت بهتری دارد.

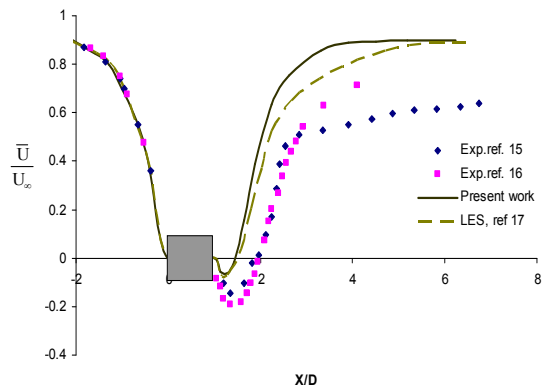
## ۴ - فضای فیزیکی و شرایط مرزی

به منظور قابل مقایسه کردن نتایج این تحقیق با برخی نتایج دیگر، جریان هوا با سرعت  $14 \text{ m/s}$  (رینولدز مقطع مورد مطالعه  $Re_x = 8.4 \times 10^5$ ) و دمای  $20^\circ \text{C}$  به موازات صفحه تخت با دمای ثابت  $70^\circ \text{C}$  جریان دارد. یک مانع چهارگوش به ضخامت  $t = 8 \text{ mm}$  میلیمتر و طول متغییر  $c = (16, 32, 40, 64)$  میلیمتر در فاصله  $L = 135 \text{ cm}$  از ابتدای صفحه تخت در فواصل متفاوت  $d = (50, 22, 11, 6, 2) \text{ mm}$  از صفحه تخت قرار داده می‌شود. شکل (۱) هندسه کلی و میدان محاسباتی جریان را نشان می‌دهد. به منظور کاهش تعداد گره‌های محاسباتی، فضای محاسباتی از نقطه  $x = 1050 \text{ mm}$  از لبه حمله صفحه تخت تا  $x = 2000 \text{ mm}$  فرض شده است، شکل (۲). بنابراین پروفیل متغیرهای سرعت،  $k$ ،  $\varepsilon$  دما به عنوان شرایط اولیه به برنامه رایانه‌ای داده می‌شود. به این ترتیب که ابتدا برنامه برای صفحه تخت کامل از  $x = 0$  تا  $x = 2000 \text{ mm}$  رانده می‌شود. سپس نتایج به دست آمده در  $x = 1050 \text{ mm}$  به صورت چند جمله‌ای درجه ۱۰ برای فضای فیزیکی کوتاه شده به کار برده می‌شود. شکل کلی این چندجمله‌ای برای  $k$  و  $\varepsilon$  در ورودی به شکل زیر محاسبه شده است:

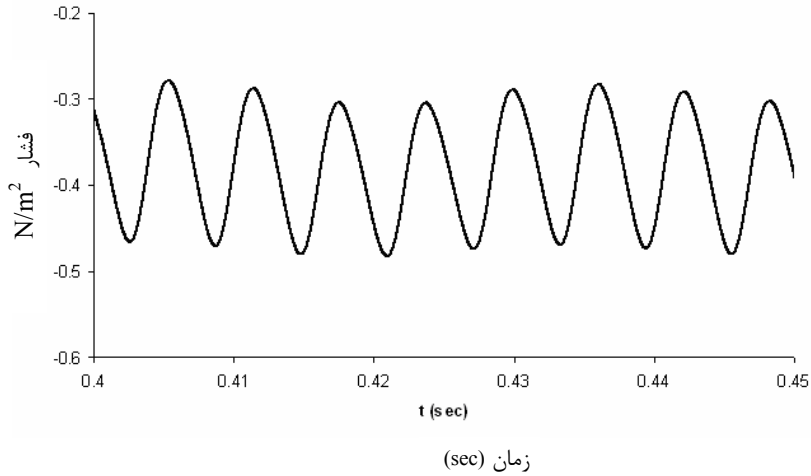
$$k(Iy,1) = \sum_{i=0}^{10} \alpha_i \cdot \alpha^i \quad (20)$$



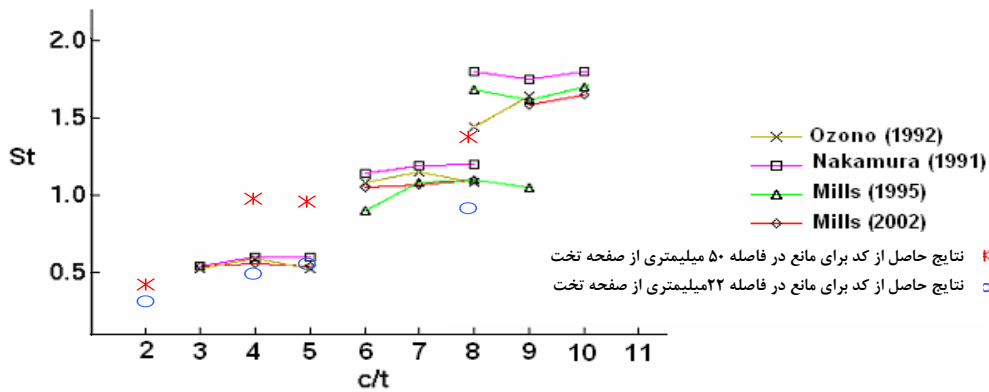
شکل ۴- صحت سنجی محاسبه انرژی جنبشی مغشوش محاسبه شده توسط کد این تحقیق در مقایسه با نتایج دیگر



شکل ۳- مقایسه دقت محاسبه سرعت متوسط کد استفاده شده در این تحقیق با نتایج دیگر



شکل ۵- تغییرات فشار پشت مانع ناشی از رهایی گردابه‌ها با زمان. نسبت ابعادی مانع  $c/t=2$  فاصله از صفحه تخت ۱۱ میلی‌متر



شکل ۶- تغییرات عدد اشتروال با نسبت  $c/t$

لحظات ابتدایی که هنوز جریان به حالت پایدار نرسیده برای مانع با نسبت ابعادی  $c/t=5$  در فاصله ۶ میلیمتری از صفحه تخت نشان داده شده است. در فواصل ۲ و ۱۱ میلیمتری نیز همین نتایج حاصل می‌شود.

در جدول (۲) تغییرات عدد اشتروهال برای نسبت ابعادی  $c/t=\{2,4,5,8\}$  که مانع کاملاً در داخل لایه مرزی مغشوش واقع شده است با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

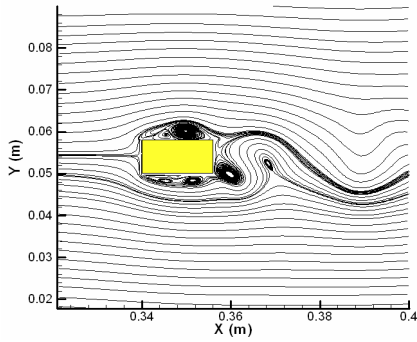
### ۵-۲- تغییرات ضریب انتقال گرما موضعی

تغییرات ضریب انتقال گرما موضعی روی صفحه برای چهارگوش با  $c/t=2$  در فواصل مختلف از صفحه تخت در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است قبل از رسیدن جریان به مانع، تغییرات ضریب انتقال گرما همان مقادیر مربوط به صفحه تخت را دارد. در نزدیکی مانع، با تشکیل یک نقطه سکون در لبه حمله ضریب انتقال گرما کاهش می‌یابد. با رسیدن جریان به مانع و تشکیل جت در قسمت زیرین مانع، افزایش قابل توجهی در ضریب انتقال گرما مشاهده می‌شود. این افزایش در شکل (۱۰) تا ۳ برابر مقدار مربوط به صفحه تخت تنها در همین نقطه است که در شکل (۱۰) به صورت جهش AB نمایش داده شده است. نقطه C روی منحنی مربوط به لبه انتهایی مانع است که جریان سیال از زیر مانع خارج می‌شود. در فاصله BC لایه مرزی در فاصله میان صفحه تخت و مانع به تدریج رشد کرده ضریب انتقال گرما را کاهش می‌دهد. در نقطه E یک و یک ضریب انتقال گرما را مجدداً افزایش داده است. اما قبل از آن یک نقطه کم تحرک، نقطه D موجب کاهش قابل توجهی در ضریب انتقال گرما می‌شود. نقاط نظیر روی شکل (۱۰) متناظراً بر روی شکل (۹-الف) مشخص شده‌اند. این موج سینوسی افزایش و کاهش ضریب انتقال گرما، تا انتهای صفحه و تا جایی که گردابه‌ها و به دنبال آن نوسانات جریان به طور کامل از بین نرفته‌اند ادامه دارد و بعد از آن جریان و در نتیجه ضریب انتقال گرمای متوسط، روند عادی خود یعنی مشابه صفحه تخت را پیدا

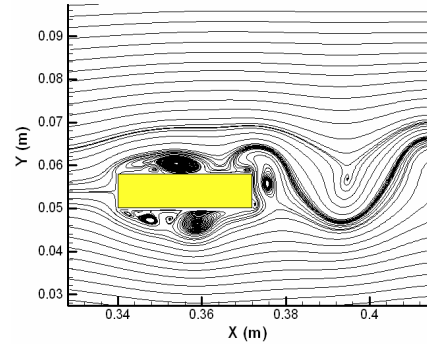
گردابه در یک گروه قرار می‌گیرند و عدد اشتروهال برای این موانع تقریباً ثابت است. با افزایش طول مانع،  $c/t=8$  تعداد گردابه‌ها روی دیواره‌های مانع بیشتر می‌شود و همچنین رهایی گردابه‌ها در پشت مانع نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه عدد اشتروهال جهش می‌یابد و در پله بالاتری قرار می‌گیرد. تعداد گردابه‌ها روی موانع با نسبت ابعادی مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. با کاهش فاصله مانع به ۲۲ میلیمتری از صفحه تخت، بخشی از مانع درون لایه مرزی قرار می‌گیرد. به دلیل وجود گرادیان سرعت در سمتی که داخل لایه مرزی فرو رفته است و عدم تقارن توزیع سرعت در دو سمت مانع، تعداد گردابه‌ها و در نتیجه فرکانس رهایی گردابه‌ها کاهش می‌یابد، شکل (۸). در این حالت نیز موانع مستطیلی با نسبت ابعادی  $c/t=[4,5]$  در یک گروه یا در یک مقدار از عدد اشتروهال قرار می‌گیرند. در شکل (۹) گردابه‌های روی مانع برای نسبت‌های ابعادی مختلف هنگامی که مانع در فاصله ۲۲ میلیمتری از صفحه قرار دارد نشان داده شده است. برای نسبت ابعادی  $c/t=2$  مشاهده می‌شود که لایه برشی جدا شده از لبه حمله به طور مستقیم بر لبه پشتی تاثیر نمی‌گذارد و گردابه‌ای در لبه حمله تشکیل نمی‌شود. برای موانع با  $c/t=[4,5]$  نیز مشاهده می‌شود که تعداد گردابه‌ها روی مانع نسبت به حالت  $(d=50\text{ mm})$  کاهش می‌یابد. برای مانع با  $c/t=8$  نیز کاهش تعداد گردابه‌ها و در نتیجه کاهش فرکانس رهایی گردابه‌ها به وضوح دیده می‌شود.

با کاهش فاصله مانع تا صفحه تخت و قرار دادن آن به صورت کامل در لایه مرزی مشاهده می‌شود که در ابتدا گردابه‌ها روی مانع تشکیل می‌شوند و در امتداد طول آن جابه‌جا می‌شوند ولی بعد از مدت زمانی که جریان به حالت پایدار می‌رسد گردابه‌های روی لبه پایینی مانع دیگر تشکیل نمی‌شوند و فقط در لبه بالایی مانع و در لبه پایین دست آن گردابه وجود دارد. گردابه در لبه بالایی مانع بر روی سطح آن جابه‌جایی ندارد و رها شدن گردابه‌ها در پشت مانع نیز بسیار ضعیف می‌شود. در شکل (۹) گردابه‌های رو و پشت مانع در

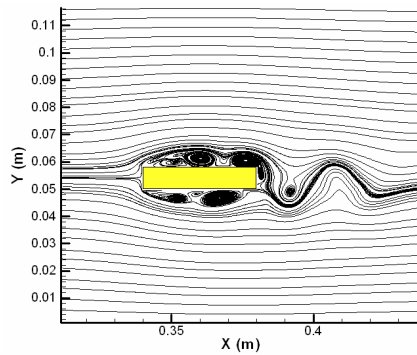




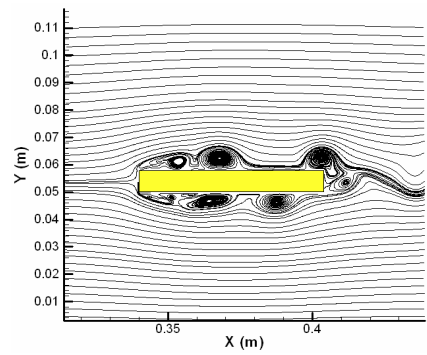
الف -  $c/t = 4$



ب -  $c/t = 2$

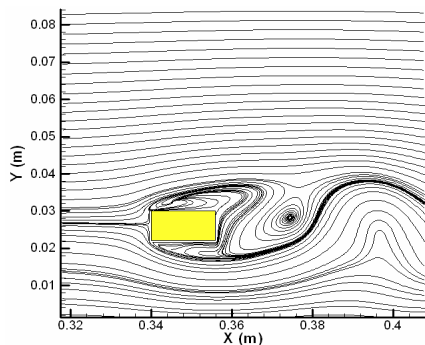


ج -  $c/t = 8$

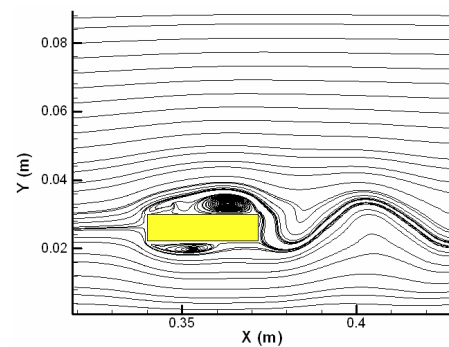


د -  $c/t = 5$

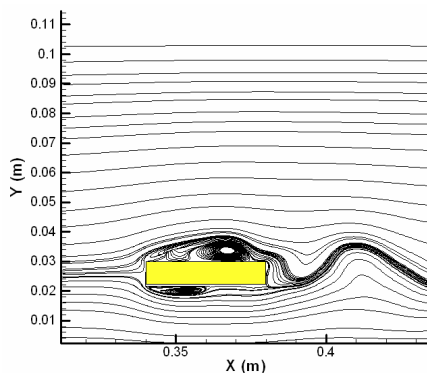
شکل ۷- تعداد گردابه‌ها روی مانع برای نسبت‌های ابعادی مختلف، فاصله مانع از صفحه تخت ۵۰ میلیمتر



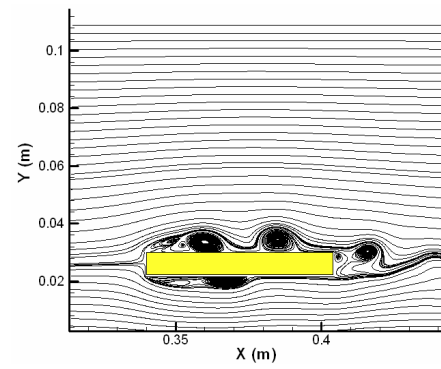
الف -  $c/t = 4$



ب -  $c/t = 2$

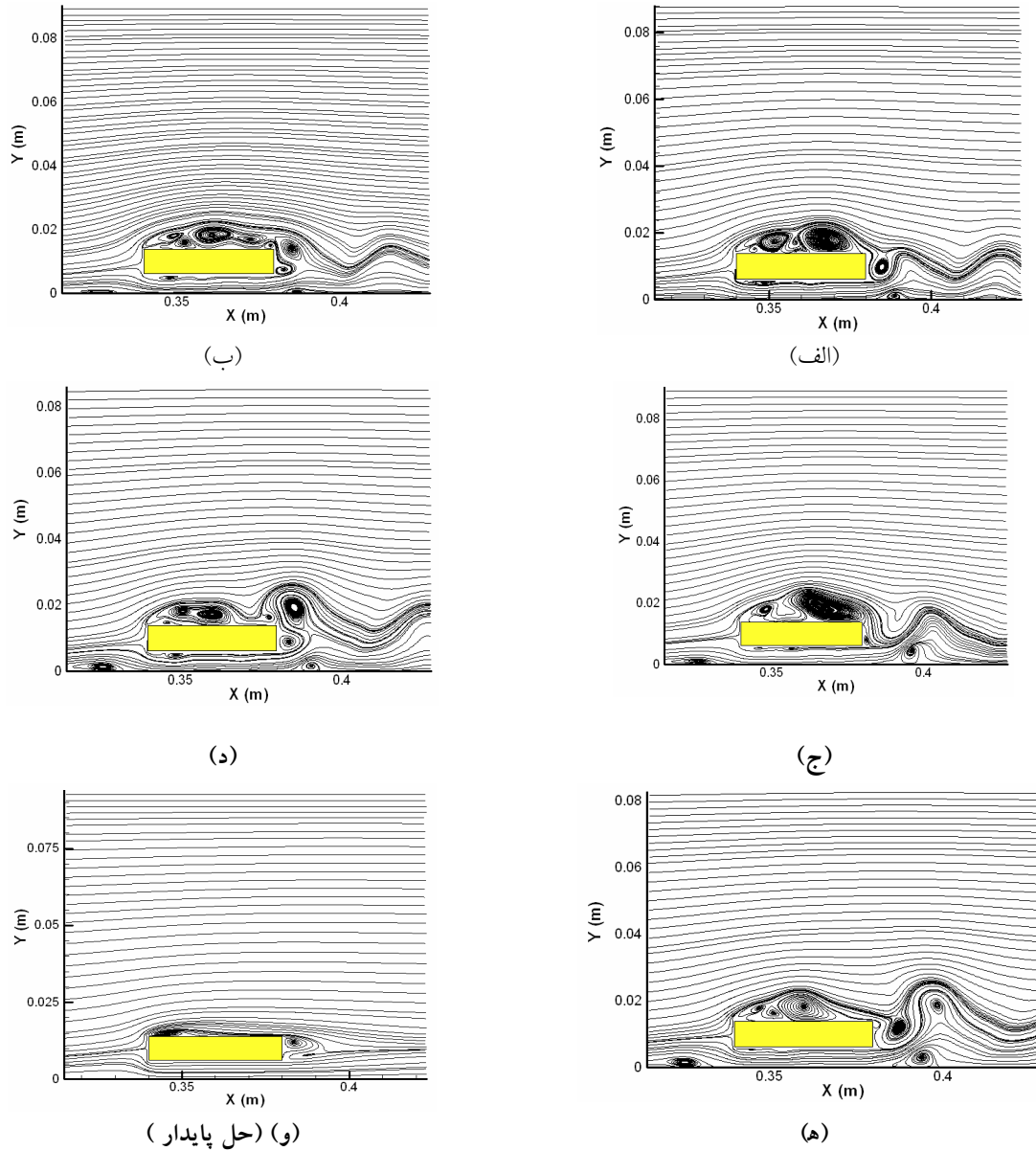


ج -  $c/t = 5$



د -  $c/t = 8$

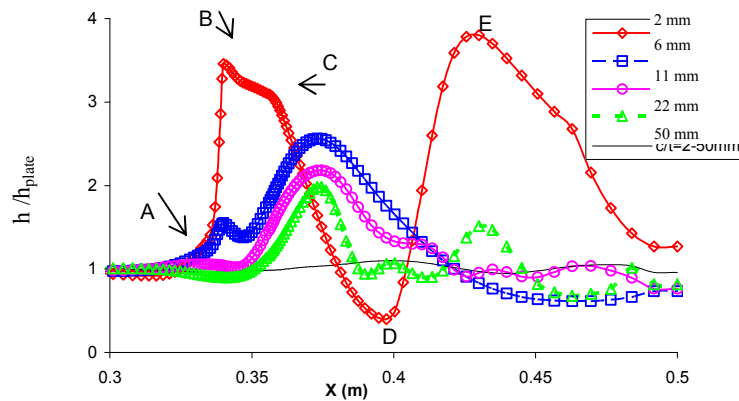
شکل ۸- تعداد گردابه‌ها روی مانع برای نسبت‌های ابعادی مختلف، فاصله مانع از صفحه تخت ۲۲ میلیمتر



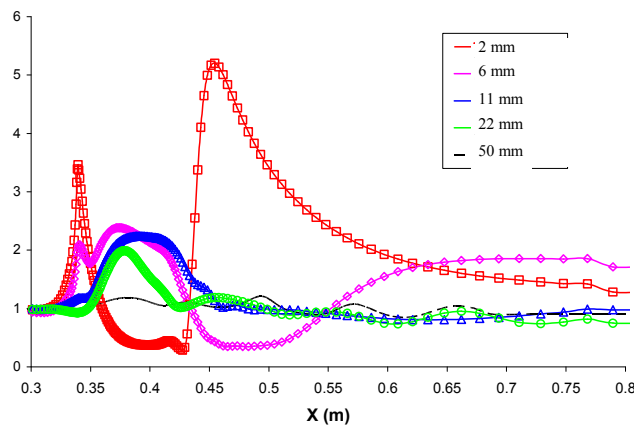
شکل ۹- مراحل توسعه و شکل‌گیری گردابه‌ها با گذشت زمان در پشت یک مانع چهارگوش  
فاصله مانع از صفحه تخت ۲۲ میلی‌متر ( $c/t=5$ )

جدول ۲- تغییرات عدد اشتروال با نسبت  $c/t$  متغیر در فواصل مختلف از صفحه تخت

۸	۵	۴	۲	$c/t$
				فاصله از صفحه تخت (mm)
۱/۳۷	۰/۹۵۷	۰/۹۷۵۲	۰/۴۲۶۶	۵۰
۰/۹۱۴	۰/۵۶	۰/۵۰۷	۰/۳۱۹	۲۲
۰/۱۹۳	۰/۱۷۱	۰/۱۵۳	۰/۱۴۵	۱۱
۰/۱۸۴	۰/۱۶۸	۰/۱۴۷	۰/۱۴۲	۶
۰/۱۶۳	۰/۱۴۳	۰/۱۳	۰/۱۰۵	۲



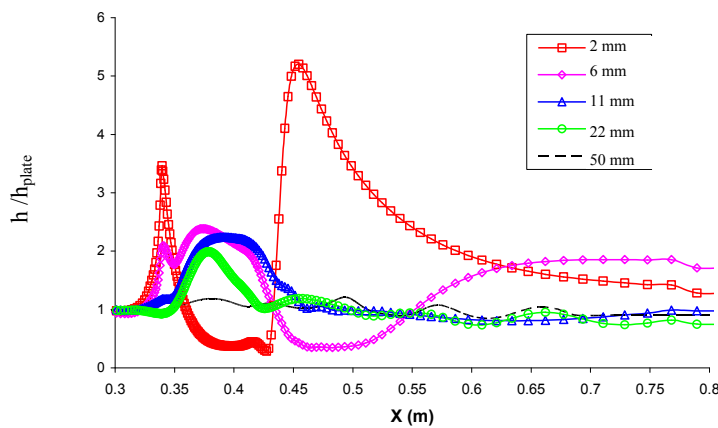
شکل ۱۰- تغییرات ضریب انتقال گرما روی صفحه تخت تحت تاثیر مانع با نسبت ابعادی  $c/t=2$ . هر منحنی مربوط به یکی از فاصله‌های  $d=[2,6,11,22,50]$  mm از صفحه تخت است. هردو مقدار  $h$  و  $h_{plate}$  به صورت موضعی و مربوط به یک نقطه از صفحه هستند.



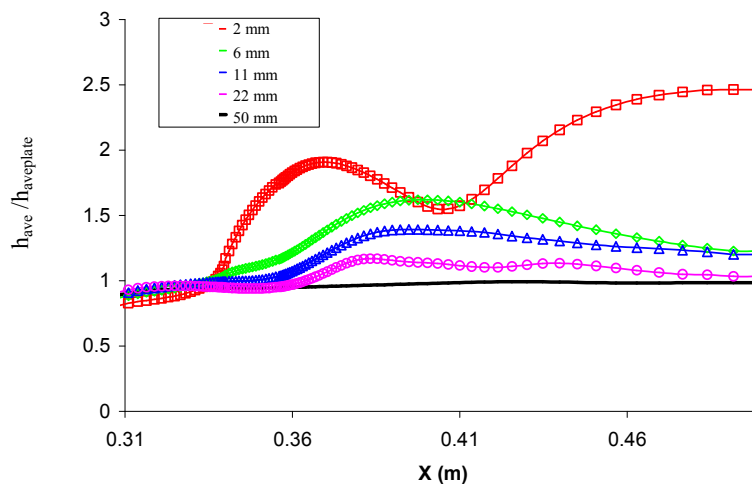
شکل ۱۱- تغییرات ضریب انتقال گرما نسبت به فاصله مانع از صفحه تخت در طول صفحه  $(c/t=5)$ . هردو مقدار  $h$  و  $h_{plate}$  به صورت موضعی و مربوط به یک نقطه از صفحه هستند.

گرما، در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب ضرایب انتقال گرما برای موانع با نسبت ابعادی  $c/t=[5,8]$  در فواصل مختلف از صفحه تخت رسم شده است. همان طور که در شکل‌ها مشخص است، روند عمومی کردارها در فواصل مختلف تقریباً مشابه روند توضیح داده شده در مورد مانع  $c/t=2$  است. افزایش ضریب انتقال گرما به علت تشکیل جت در ابتدای مانع تقریباً در مورد سه مانع  $c/t=[2,5,8]$  در فواصل مختلف از صفحه تخت مشابه یکدیگر است. ولی طول جت با افزایش طول مانع افزایش یافته است.

می‌کند. این توضیح از نظر کیفی برای تمام لایه‌های تحریک شده در این تحقیق صحیح است و در شکل‌های مختلف به خوبی مشاهده می‌شوند. با افزایش فاصله مانع از صفحه تخت مقدار ضریب انتقال گرما روند نزولی طی می‌کند، زیرا اثر مانع بر تحریک لایه مرزی کاهش می‌یابد. در فواصل ۲، ۶ و ۱۱ میلیمتری که مانع کاملاً داخل لایه مرزی قرار گرفته است و بیشترین اثر را بر رفتار کنار دیواره می‌گذارد، تغییرات ضریب انتقال گرما بسیار شدید است. به منظور مطالعه تاثیر افزایش طول مانع بر ضریب انتقال



شکل ۱۲- تغییرات ضریب انتقال گرما روی صفحه تخت، تحت تاثیر فاصله مانع از صفحه تخت ( $c/t=8$ ) هر دو مقدار  $h$  و  $h_{plate}$  به صورت موضعی و مربوط به یک نقطه از صفحه هستند.



شکل ۱۳- مقایسه ضریب انتقال گرما متوسط مکانی نسبت به فاصله مانع از صفحه تخت، نسبت ابعادی مانع ( $c/t=2$ ) هر دو مقدار  $h$  و  $h_{plate}$  به صورت موضعی و مربوط به یک نقطه از صفحه هستند.

تخت است. با توجه به افزایش ضریب انتقال گرمای موضعی در اطراف مانع، ضریب انتقال گرمای متوسط نیز در این نواحی افزایش نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که تحریک لایه مرزی هنگامی که مانع در فاصله ۲ میلیمتری از صفحه تخت قرار دارد از همه حالات بیشتر است و بنابراین افزایش ضریب انتقال گرما در این فاصله بیشترین مقدار است.

#### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر یک چهار گوش با نسبت ابعادی ( $c/t$ )

#### ۵-۳- تغییرات متوسط مکانی ضریب انتقال گرما

ضریب انتقال گرمای متوسط مشخص کننده افزایش ضریب انتقال گرما در یک طول معین است. بنابراین یکی از موضوعات مهم در این مطالعه، انتقال گرمای متوسط است.

با توجه به کاهش ضریب انتقال گرمای موضعی در مقابل افزودن فاصله مانع از صفحه، ضریب انتقال گرمای متوسط نیز کاهش می‌یابد. به عنوان مثال مطابق شکل (۱۳) هنگامی که مانع در فاصله ۲ میلیمتری صفحه قرار دارد، ضریب انتقال گرمای متوسط تا حدود ۲/۵ برابر ضریب انتقال گرما بر روی صفحه

صفحه، این ضریب انتقال گرما به طور متوسط تا ۵۰٪ و به طور موضعی تا ۳ برابر مقدار مربوط به صفحه تخت تحریک نشده، افزایش می‌یابد. همچنین رهایی پریودیک گردابه‌ها از دو طرف چهارگوش با نزدیک شدن مقطع به صفحه تخت به تدریج یکطرفه و در نهایت به حالت یک گردابه پایدار در پایین دست مانع تبدیل می‌شود. نتایج به دست آمده تاثیر قابل توجه افزایش ضریب انتقال گرما از یک دیواره در حضور یک چهارگوش را تأیید می‌کند. همچنین نشان داده می‌شود که با نزدیک شدن مقطع به دیواره، عدد اشتروهال به سمت صفر میل کرده و خاصیت رهایی تناوبی گردابه‌ها به حضور دایمی فقط یک گردابه با نوسانات ابعادی، تبدیل می‌شود.

که در مسیر یک جریان آزاد واقع شده بر شکل‌گیری و تعداد گردابه‌های رها شده از انتهای مانع مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که تغییرات عدد اشتروهال به صورت پله‌ای تابعی از تغییرات نسبت  $c/t$  است. سپس مقطع مستطیلی به سمت یک صفحه تخت که با جریان اصلی در حال تبادل گرماست میل داده می‌شود و اثر فاصله  $c/t$  بر ضریب انتقال گرما از صفحه تخت و تاثیر لایه مرزی بر شکل‌گیری گردابه‌ها و عدد اشتروهال بررسی شده است. ملاحظه می‌شود که با نزدیک شدن مقطع به صفحه تخت ضریب انتقال گرما از صفحه به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای برخی نسبت‌های ابعادی و بعضی فاصله‌ها از

## مراجع

1. Nakamura Y., Ohaya Y., and Tsuruta H., "Experiments on Vortex Shedding from Flat Plates with Square Leading and Trailing Edges," *J. Fluid Mech.* Vol. 222, PP. 437-447, 1991.
2. Mills R., Sheridan J., Hourigan K., and Welsh M.C. "The Mechanism Controlling Vortex Shedding from Rectangular Bluff bodies," *Proceeding of the Twelfth Australasian Fluid Mechanics Conference*, Sydney, Australia, PP. 227-230, December 1995.
3. Okajima A., Ueno H., and Sakai H., "Numerical Simulation of Laminar and Turbulent Flows Around a Rectangular Cylinder," *International Journal for Numerical Method in Fluids*, 1992.
4. Ohaya Y., Nakamura Y, Ozono S., Tsuruta H., and Nakayama R. "A Numerical Study of Vortex Shedding from Flat Plate with Square Leading and Trailing Edge," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 236, PP. 445-460, 1992.
5. Stokes A.N., and Welsh M.C. "Flow-Resonant Sound Interaction in a Duct Containing a Plate," Part II: Square Leading Edge, *J. Sound Vib.* Vol. 104, PP. 55-73, 1986.
6. Mills R., Sheridan J., Hourigan K., and Welsh M.C., "The Mechanism Controlling Vortex Shedding From Flat Plate With Square Leading Edge And Trailing Edge," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 15, PP. 1025-1036, 1995.
7. Tan B.T., Thompson M.C., and Hourigan K. "Simulated Flow Around Long Rectangular Plates under Cross Flow Perturbations," *Int. J. Fluid Dynamics*, Vol.2, Article 1, 1998.
8. Mills R., Heriadan J., and Hourigan K., "Particle Image Velocimetry and Visualization of Natural and Forced Flow Around Rectangular Cylinders," Department of Mechanical Engineering, Monash University, 3800, Australia, 7 October 2002.
9. Bhattacharyya S., and Maiti D.K., "Shear Flow Past a Square Cylinder Near a Wall," *Indian Institute of Technology - Kharagpur*, 2004.
10. Svetlana, P., and Gianluca, I., "Simulating Separated Flows Using the  $k-\epsilon$  Model," *Annual Research Briefs*, Center for Turbulence Research, U.S.A., 2001.
11. Davidson, L., "an Introduction to Turbulence Models," publication 97/2, Department of Thermo and Fluid Mechanics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, Nov. 2003.
12. Paulo, J., Oliveria, "On the Numerical Implementation of Nonlinear Viscoelastic Model in a Finite-Volume Method," *Numerical Heat Transfer*, Part B, Vol. 40, PP. 283-301, 2001.
13. Kays. W.M., *Convection Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill book Company, New York, 1994.
14. Minkowycz W.J., Sparrow E.M., Schneider G.E., and Pletcher R.H. *Handbook of Numerical Heat Transfer*, John Wiley & Sons Inc. ISBN 0-471-83093-3, PP. 355-357, 1988.
15. Lyn, D.A., "Private communication," 1990.
16. Lyn, D.A., "Phase-averaged Turbulence Measurements in Separated Shear -Layer Region of Flow Around a Square Cylinder," *Proc. 23rd Congress of International Association for Hydraulic Research*, Ottawa, PP. A85-A92, 1989.
17. Murkami, S., Mochida A., and Sakamoto S.H., *Information on Numerical Analysis of Vortex Shedding Behind a Bluff Body*, Taisei Corporation, Private Communication, 1992.