بهبود ضریب انتقال حرارت روی صفحه تخت به کمک تحریک لایه مرزی

محسن کهرم[۱]; بهروز ظفرمند[۲]; علی رضا اکسیر[۳]

چکیده

در این تحقیق رفتار جریان آشفته در اطراف یک مانع مثلث شکل، تولید گردابه و اثر آن بر تحریک لایه مرزی بر روی یک صفحه تخت که در مجاورت مانع قرار دارد بررسی شده است. هدف از این پژوهش، برآورد میزان تاثیرگذاری گردابه های تولید شده در تحریک لایه مرزی و افزایش ضریب انتقال حرارت از صفحه تخت است. اندازه گردابه های تولیدی با تغییر اندازه اضلاع و زوایای مانع مثلثی شکل کنترل می‌شود. اضافه بر این، فاصله مانع مثلثی از صفحه تخت نیز تغییر داده می‌شود، همچنین طول یک ضلع و اندازه زاویه ضلعی که در تولید گردابه موثر است کم کم تغییر داده می‌شوند و در هر حالت، مقدار و چگونگی اثر بر تحریک لایه مرزی و تغییر ضریب انتقال حرارت از صفحه تخت محاسبه و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مانع مثلثی یک نقطه سکون، یک جت در زیر مانع و دو گردابه در پشت مانع تولید می‌کند که هردو گردابه بر عملکرد لایه مرزی تاثیر قابل توجهی می‌گذارند. گردابه نزدیکتر به مانع، عامل کاهش ضریب انتقال حرارت و گردابه دورتر، عامل افزایش قابل توجه در ضریب انتقال حرارت است.

کلمات کلیدی:

گردابه، تحریک لایه مرزی، لایه درهم

Heat Transfer Enhancement from a Flat Plate by Vortex Shedding Behind a Triangular Obstacle

M.Kahrom; B.Zafarmand; S.M.Javadi; A.Exier

ABSTRACT

In this paper development of turbulent flow around a triangular obstacle, its vortex generation and resulting effect on neighboring turbulent boundary layer of a flat plat, are studied. Vortex shedding controlled in size and position by changing side length and relevant angles of the triangle. The distance from the plate changed gradually from a point stuck to the plate to points far inside the free stream. As a result in each step, a stagnation point forms on frontal area, a jet at the beneath of the obstacle and one, two or three vortices after the rear face. Each of flow developments contributes to local heat transfer coefficient of neighboring flat plate. Most effective part seems to be the last vortex at downstream to the obstacle. Its local contribution to total enhancement is about 80% when total heat transfer compared to that of a single flat plate of a similar flow field. The overall heat transfer enhancement over the affected area is about 60%.

KEYWORDS:

heat transfer enhancement, vortex shedding, wake, stagnation point

[۱] دانشیار – دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. Mohsen.kahrom@yahoo.co.uk

[۲] استادیار – مجتمع عالی آموزشی پژوهشی صنعت آب و برق (خراسان)

[۳] کارشناس ارشد – دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۱- مقدمه

نیاز رو به رشد مهندسین در کنترل فرایندها، از جمله کنترل ضریب انتقال حرارت، زمینه جدیدی در تحقیقات لایه مرزی ایجاد کرده است.در این زمینه اولین مباحث مربوط به فرایند شکل گیری و توسعه امواج تولمین- شلشتینگ و در پایان کنترل طول لایه مرزی گذرا بوده است، [۱]. امروزه چگونگی امکان دخالت در ساختار لایه مرزی درهم و روش های تحریک آن بمنظور کنترل ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک مورد توجه است. در لایه های گذرا تاثیر گذاری بر امواج تولمین-شلشتینگ و در لایه های درهم تاثیرگذاری بر نمایه سرعت و از این طریق بر تنش برشی، از موضوعات مورد توجه بشمار می‌آیند. بطور کلی هر محقق با انتخاب روش خود می‌خواهد عوامل پایه در شکل دهی لایه مرزی را به میل خود تحت تاثیر قرار دهد و از این طریق ضریب انتقال حرارت یا اصطکاک را کنترل نماید. *فرانسون*[۲]، با استفاده از مکش از لایه مرزی نمایه سرعت را کنترل نمود و با این روش تنش برشی بر سطح را کاهش داد. *یارین* [۳] با تزریق پلیمربه لایه مرزی و جریان درهم، توربولنسی جریان را کاهش داد و با این روش تنش برشی را کنترل نمود. پلیمر با زنجیره بلند ملکولی خود و چسبندگی بر ذرات سیال که در اطراف رشته ملکولی حرکت می‌کنند، حرکت گردابه ای ذرات و نوسانات سرعت را کنترل می‌کند و از این رو به کاهش تنش های رینولدز کمک می‌کند. *گنتری* [٤] در آزمایشگاه با چسباندن زبری هائی به شکل مثلث، مستطیل و غیره لایه مرزی را تحریک نمود و توانست ضریب انتقال حرارت صفحه تخت را تا ۵۰ تا ٦۰٪ ضریب انتقال محلی را افزایش دهد. شی یانگ [۵] یک مانع مستطیلی را در یک کانال قائم قرار داد و با تغییر قطر مانع ضریب انتقال حرارت جابجائی آزاد را روی دیوارهای کانال محاسبه نمود. نتایج نشان دادند که افزایش ابعاد مانع تا ۳۰٪ عرض کانال می‌تواند تا ۱۹٪ میزان انتقال حرارت را افزایش دهد. بهرامی و همکاران [٦]، اثر زبری سطح در همزنی لایه مرزی بر افزایش شدت توربولنس در کنار دیواره ها را بررسی نمودند. همینطور با قرار دادن بلندی هائی بر روی دیواره تولید و تقویت گردابه و شدت توربولنسی در لایه های کنار دیواره را افزایش دادند. نتایج نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک و انتقال حرارت با تاثیر گذاری زبری افزایش می‌یابند. *خلکی* و همکاران [۷]، بر روی صفحه تخت یک مولد گردابه[1] قرار دادند و با استفاده از روش عددی و مدلهای توربولنسی، گردابه های تولید شده و اثر آنها بر تحریک لایه مرزی و افزایش ضریب انتقال حرارت را بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که میزان انتقال حرارت تا ۲۵٪ افزایش داشته است [۷]. فرهبد و کهرم [۸]، با وارد کردن یک مقطع مستطیلی به داخل لایه مرزی درهم و با نزدیک کردن تدریجی آن به دیواره، یک لایه مرزی درهم را تحریک نمودند. نتایج نشان داد که در اطراف این مانع یک نقطه سکون، یک جت و یک یا دو گردابه در پائین دست مانع تشکیل می‌شود. به صورت موضعی در نقطه آغاز جت ضریب انتقال حرارت بر روی صفحه تخت، تا ۲۵۰٪ افزایش می‌یابد. همین طور روی قسمت تحریک شده، متوسط ضریب انتقال حرارت به بیش از ٦۰٪ در مقایسه با صفحه تخت در شرایط مشابه ولی بدون تحریک، افزایش انتقال حرارت دارد. اضافه بر این نتیجه گیری نمودند که نقطه سکون از عوامل کاهش، جت و ویک از عوامل افزایش ضریب انتقال حرارت هستند. محمودی و کهرم [۹]، برای تشکیل یک جت خالص، از یک ائرفویل تخت استفاده نمودند که سمت خمیده آن به سمت یک صفحه تخت قرار می‌گرفت. سپس فاصله ایرفویل را از حالت چسبیده به دیواره تا خارج لایه مرزی تغییر دادند. به این ترتیب اثر یک جت خالص و بدون ایجاد گردابه را برای تحریک لایه مرزی تولید نمودند. نتایج آزمون عددی نشان داد که جت بصورت محلی ضریب انتقال حرارت را تا۲۵۰٪ و بطور متوسط روی طولی که ۳۰ برابر طول وتر ایرفویل باشد تا ۱۱٪ افزایش می‌دهد. نتیجه دو تحقیق اخیر نشان می‌دهند که تاثیر گردابه بر تحریک لایه مرزی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

این مقاله، اثر گردابه و تاثیر اندازه آن بر تحریک لایه مرزی را ارزیابی می‌کند. یک مقطع مثلثی که یک ضلع آن همواره به موازات یک صفحه تخت قرار دارد عامل تولید گردابه فرض شده است. ضلع موازی دیواره با طول کوچکی انتخاب می‌شود تا اثر جت که در تحقیق دیگری [۹] نتایج آن بررسی شده است، حداقل سهم را در تحقیق جدید داشته باشد. همچنین تلاش می‌شود که راس رو در روی جریان، که نقطه سکون را تشکیل می‌دهد، در بررسی کنونی اثر کوچکی داشته باشد. در این تحقیق با تغییر ابعاد و زاویه های مثلث، همچنین فاصله مثلث از صفحه تخت، گردابه یا گردابه های تولید شده از نظر اندازه و موقعیت قرار گیری کنترل می‌شوند. سپس با تغییر فاصله مثلث نسبت به صفحه تخت در هر حالت تاثیر گردابه ها بر تحریک لایه مرزی درهم در روی صفحه تخت بررسی می‌شود. تحریک لایه مرزی توسط یک مانع در مواردی که امکان توسعه فضا و سطح تبادل حرارتی میسر نباشد بسیار مفید است. مانند سرد کردن تیغه های ردیف اول توربین های گاز که با گذر جریان هوای سرد از درون تیغه درجه حرارت سطح تیغه را کاهش

می‌دهند. درتجهیزات الکترونیک و کامپیوتر و مخابراتی نیز افزایش ضریب انتقال حرارت بدون تاثیر گذاری بر هندسه قطعه الکتریکی مورد توجه است. در بویلرهای نیروگاهی و در محفظه های احتراق نیز افزایش ضریب انتقال حرارت کمک می‌کند تا این تجهیزات در ابعاد کوچکتر همان بهره دهی حرارتی را داشته باشند.

۲- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی معادلات اصلی برای این جریان تراکم ناپذیر هستند:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j}=0$$
$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu\left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i}+\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right)\right]-\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{u_j u_i}) \qquad (۱)$$
$$\frac{\partial T}{\partial t}+U_j\frac{\partial T}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\theta u_j})$$

در این معادلات و پس از این، U و T بترتیب مقادیر متوسط سرعت و درجه حرارت، $-\left(\overline{u_j u_i}\right)$ تنش های رینولدز و $-\left(\overline{\theta u_j}\right)$ انتقال حرارت توربولنسی هستند. متوسط تنش رینولدز با نرخ کرنش رابطه (۲) را برقرار می‌نماید، [۱]:

$$-\overline{u_i\, u_j}=\nu_t\frac{\partial U}{\partial y} \qquad (۲)$$

در جریان توربولنسی مدل جونز- لاندر بکار برده شده است، [۱۰]. فرض می شود که این معادلات تا فاصله $y^+>۷۵$ دور از دیواره ها درست باشند:

$$\frac{\partial k}{\partial t}+U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=-(\overline{u_j u_i})\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\varepsilon+\frac{\partial}{\partial x_j}\left((\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) \qquad (۳)$$
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+U_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=\frac{\varepsilon}{k}(-C_{\varepsilon 1}(\overline{u_j u_i})\frac{\partial U}{\partial x_j}-C_{\varepsilon 2}\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left((\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) \qquad (٤)$$

در این معادلات:

$$(\overline{u_j u_i})=-C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}\frac{\partial U}{\partial x_j} \qquad (۵)$$

است و ضرائب ثابت این معادلات $C_{\varepsilon 1}=۱/۵۷$، $C_{\varepsilon 2}=۲/۰$، $\sigma_k=۱/۰$، $\sigma_\varepsilon=۱/۳$ و $C_\mu=۰/۰۹$ محاسبه یا اندازه گیری شده اند [۸]. در فواصل $y^+<۷۵$ مدل لزجت گردابه ای *ریچارد*[۲] استفاده می‌شود که نتایج آن بسیار نزدیک به نتایج بدست آمده به وسیله تابع تخفیف *وان درایست* Van Driest [۱۱] است:

$$\nu_t=\kappa\nu\left[\left(\frac{yu_\tau}{\nu}\right)-9.7\tanh\left(\frac{yu_\tau}{9.7\nu}\right)\right] \qquad (٦)$$

در روی دیواره (صفحه تخت) شرط نبودن لغزش در نظر گرفته شده است. بنابر این:

$$u=v=0. \quad\rightarrow\quad k=\overline{|u|^2}/2=0. \qquad (۷)$$

ملاحظه می‌شود که صفر بودن مقدار k از مرتبه دوم نسبت به $u=۰$ در روی دیواره است. در اینصورت حد رابطه (۳) وقتی $y\rightarrow ۰$ میل کند:

$$\varepsilon_w=\nu\frac{\partial^2 k}{\partial y^2}$$

است. و بالاخره با انتگرال گیری از این رابطه مقدار ε_w در کنار دیوار بدست می‌آید:

$$\varepsilon_w=\lim_{y\rightarrow 0}\frac{2\nu k}{y^2} \qquad (۸)$$

معادلات ۱ تا ۸ با رویه سیمپل که توسط پتنکار و اسپالدینگ ارائه شده است بر روی شبکه جابجا شده بسط داده شده اند، [۸ و۹]. در شبکه جابجا شده مولفه های سرعت در گره هایی به غیر از گره های شبکه اصلی محاسبه می‌شوند. با این ترتیب که بین هر دو گره متوالی که برای شبکه اصلی طراحی شده است یک گره روی وجه حجم کنترلی برای محاسبه سرعت بکار می‌رود. کد دارای پایداری و از دقت خوبی برخوردار است، [۱۲]. مدل توربولنسی اشاره شده در این مقاله به ضرورت به کد اصلی اضافه شده است.

۳- فضای فیزیکی، فضای محاسباتی

به منظور قابل مقایسه بودن نتایج با آزمون های قبلی، مراجع [۸] و [۹]، جریان هوای ۲۰^{C^o} با سرعت ۱٤ متر بر ثانیه به موازات یک صفحه تخت به طول ۲ متر حرکت می‌کند. در این مقطع که Re_x برای صفحه تخت تقریباً $۱۰^٦$ است، یک مقطع مثلثی که یک ضلع آن به موازات صفحه تخت و یک راس آن در نقطه سکون جلوئی قرار دارد، در مجاورت دیواره و در داخل لایه مرزی قرار می گیرد، شکل(۱). درجه حرارت صفحه تخت ۷۰^{C^o} و لایه مرزی در این مقطع درهم است.

گره بندی در هر آزمون به تعداد نهائی خاصی ختم

می‌شود که ویژه شرایط هندسی برای همان حالت است. ولی بطور اصولی رعایت شده است که در زیر لایه آرام $(y^+ \le 5)$ تعداد ٤ گره، یکی روی دیوار، یکی در $y^+ = ١$ ، یک گره در نزدیکی $y^+ = ٣$ و یک گره در $y^+ = ٥$ قرار گیرند. در لایه میانگیر[٣] و لایه لگاریتمی[٤] فاصله گره ها بصورت انبساطی و با ضریب انبساط ١/٠٨ به سمت جریان اصلی باز می‌شوند. به دلیل تعدد موقعیت هائی که مقطع مثلثی در لایه مرزی قرار می‌گیرد و همچنین هندسه های گوناگون، تعداد نهائی گره ها نیز در هر آزمون متفاوت با دیگری است. لذا آزمون نبود وابستگی به گره ها با دشواری روبرو است. به همین دلیل برای آزمون بدون وابستگی نتایج به گره بندی و دقت کد محاسباتی قابلیت کد یکبار برای انتقال حرارت از صفحه تخت بدون تحریک لایه مرزی، شکل (٣)، و در آزمون دیگر توانائی نرم افزار برای تشخیص خصوصیات تشکیل گردابه در پشت یک پله استاندارد با نتایج مرجع مقایسه شده است. اضافه بر این وابستگی نتایج به شبکه محاسباتی بطور کامل در مقاله دیگری گزارش شده است، [١٣]. در تمام موارد یاد شده نتایج بدست آمده از این کد با نتایج آزمایشگاهی استاندارد و نتایج کدهای دیگر مقایسه شده است. شکل های (٣) و (٤) نمونه ای از همین ارزیابی را نمایش می‌دهد. طول بازچسب در پشت پله ٧/٩ برابر ارتفاع پله برای $\mathrm{Re}_H = ٥٠٠٠$ بدست می آید. مقدار استاندارد گزارش شده نیز بین ٦/٥ تا ٧/٥ برابر ارتفاع پله است. لذا خطای این کد ٥/٥٪ برای طول باز چسب و اندازه طول گردابه پیش بینی می‌شود. خطای پیش بینی ضریب انتقال حرارت لایه مرزی درهم در مقایسه با نتایج دقیق حداکثر ٦/٤٪ و برای ضریب اصطکاک ٥/١٪ بدست آمده است. با این نتایج فرض می‌شود که کد حاضر دارای دقت مناسبی برای تحقیق کنونی است. در آزمون وابستگی کد به ابعاد شبکه، استفاده از ضریب انبساط ١/٠٨ برای فاصله گره ها بهترین نتیجه را بدست داده است که در گزارش فعلی از آن استفاده شده است، [١٣].

٤- آزمون ها و نتایج

آزمایش برای چند مانع مثلثی انجام شده است. درحالت‌های مورد بررسی زوایای راس C مثلث، α در شکل ٢، به ترتیب برابر ٣٠، ٤٥، ٦٠، ٩٠ انتخاب شده اند. به ازاء هر یک از این زاویه ها یک مقدار برای ضلع b به ترتیب برابر ٨، ١٠، یا ١٣ میلیمتر و به ازاء هر مقدار b یک مقدار نیز برای ضلع a به ترتیب برابر ٤، ٨ یا ١٦ میلیمتر در نظر گرفته شده است. برای هر شکل از مثلث که ترکیبی از سه متغیر فوق باشد، فاصله قاعده مانع مثلثی از صفحه تخت h نیز تغییر داده شده و به ترتیب برابر ٢، ٤، ٨، یا ١٧ میلیمتر از صفحه تخت قرار داده شده است. اضافه بر این ١٤٤ آزمون عددی، عدد Re_x نیز برابر سه مقدار:

$$\mathrm{Re}_x = [٤٦٦، ٦٤١، ٨٧٦]\times ١٠٠٠$$

فرض شده اند. در هر مورد توزیع ضریب انتقال حرارت ت آزمایش شد. در هر مورد توزیع ضریب انتقال حرارت تحت تاثیر تغییرات بوجود آمده در اطراف مانع مثلثی محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه و بررسی شده است.

نتایج نشان می‌دهند که تغییرات زاویه در راس C می‌تواند اندازه گردابه پشت جسم را تا اندازه زیادی تغییر دهد. با افزایش زاویه C از ٣٠ درجه تا ٩٠ درجه، ضریب انتقال حرارت متوسط از صفحه تخت از ٢٠٪ تا ٣٣٪ افزایش می یابد، شکلهای (٥) تا (٨). وقتی که زاویه C برابر ٣٠ درجه است گردابه تشکیل شده قابل تشخیص نیست. با افزایش این زاویه (شکل های ٦ تا ٨) اندازه گردابه به تدریج بزرگتر شده و مرکز چرخش گردابه به فاصله های دورتر جابجا می‌شود و ضریب انتقال حرارت رو به افزایش می‌رود، شکل های (٩) و (١٠).

در شکلهای (١١) تا (١٤) فاصله مثلث از صفحه تخت افزایش داده شده است. تغییرات ضریب انتقال حرارت روی صفحه تخت در شکل (١٥) دیده می‌شود. ملاحظه می‌شود که با دور شدن مثلث از صفحه تخت تحریک لایه مرزی نیز کاهش یافته و در هر دو مورد جت و ویک، اثر تحریکی به سمت صفر میل می‌کند. میزان انتقال حرارت از ٣٣٪ که در آزمایش قبل افزایش داشته است در بهترین حالت به ٧٪ برای هنگامی که مثلث در فاصله $١/٥\delta$ از صفحه تخت قرار دارد؛ کاهش می‌یابد، شکل (١٦).

اندازه ضلع a مثلث در تحریک لایه مرزی بسیار مؤثر است. در شکل های (١٧) تا (١٩) دیده می‌شود که افزایش این ضلع در گنده گی وِیک تا چه اندازه تاثیر گذاشته است. شکل (٢٠) تغییرات ضریب انتقال حرارت روی صفحه تخت را نشان می‌دهد. طول منطقه تاثیر پذیر از گردابه بسیار وسعت یافته است. در شکل (٢١) دیده می‌شود که ضریب انتقال حرارت متوسط روی صفحه تخت تا ٦٠٪ بطور متوسط افزایش داشته است.

در حالت مانع با شکل مثلث قائم، تغییر اندازه قاعده باز هم اندازه ویک و قرارگاه نقطه مرکز ویک را تغییر می‌دهد. اثر جت ابتدا یک افزایش بهمراه دارد. موضوعی که در این آزمون آشکار شده است اثر گردابه کوچکی است که بلافاصله پس از مثلث شکل می‌گیرد. این گردابه موجب افزایش به مقدار کم در انتقال حرارت می‌شود(نزدیک به١٢٪) سپس یک کاهش که

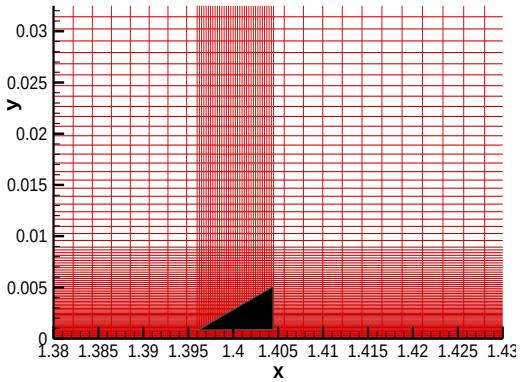
مربوط به محدوده قبل از ویک دوم است اتفاق می‌افتد. در بررسی بردارهای سرعت و خطوط جریان در این محدوده دیده می‌شود که جریان سیال بسیار کم سرعت شده است. در ادامه مسیر دوباره در منطقه ویک دوم جریان سرعت بیشتری می‌گیرد و ضریب انتقال حرارت نیز به مقدار زیاد و گسترده افزایش می‌یابد. افزایش فاصله مثلث با دیوار تخت مرکز ویک دوم را به فاصله دورتر از مانع مثلثی انتقال می‌دهد. افزایش طول قاعده مثلث موجب دوتائی شدن ویک پشت مانع شده و ضریب انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. در این آزمون بیشترین اثر تحریکی ضریب انتقال حرارت تا نزدیک ۵۵٪ و کمترین مقدار آن ۱۲٪ افزایش است.

عدد Re_x نیز در تغییر ضریب انتقال حرارت موثر است. چند آزمایش نشان می‌دهد که تغییر عدد رینولدز بیشترین اثر خود را در محدوده ویک دوم بجا می‌گذارد. با افزایش عدد رینولدز محدوده ویک دوم بزرگتر شده و ضریب انتقال حرارت ماکزیمم نیز افزایش می‌یابد. تاثیر عدد رینولدز در افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط در شکل (۳۱) نشان داده شده است.

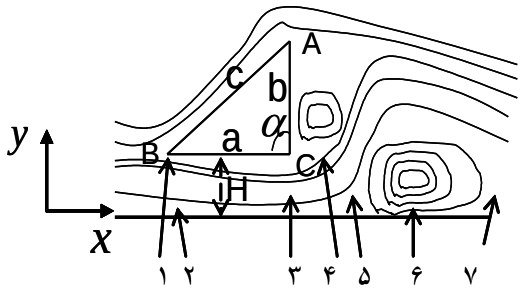
۵- نتایج

تاثیر یک مقطع مثلث در تحریک لایه مرزی درهم روی صفحه تخت بررسی شده است، شکل (۲). نتایج نشان می‌دهد که عوامل تحریکی لایه مرزی ناشی از حضور یک مثلث در داخل یا در نزدیکی لایه مرزی درهم موجب شکل گیری یک جت در فاصله (نقاط ۲ تا ۳)، تشکیل دو ناحیه گردابه ای که با فاصله از یکدیگر قرار دارند (در نقاط ٤ و ٦) و یک منطقه کم سرعت (در نقطه ٥) در پائین دست مثلث می‌شود. جت همواره از عوامل افزایش ضریب انتقال حرارت است. منطقه ویک (در نقطه ٤) از عوامل کاهش ضریب انتقال حرارت، منطقه سکون (در نقطه ٥) از عوامل کاهش ضریب انتقال حرارت و در پایان منطقه ویک (در نقطه ٦) موجب افزایش ضریب انتقال حرارت هستند. بیشترین افزایش، هم از نظر مقدار و هم گستردگی در طول صفحه، مربوط به منطقه ویک دوم، (٦) و کمترین اثر مربوط به جت است. سهم ویک (منطقه ٥ تا ٧) در افزایش متوسط انتقال حرارت تا حدود ۸۰٪ و سهم جت نزدیک به ٥٪ از کل انتقال حرارت است. به کمک یک مقطع مثلثی می توان بطور متوسط ضریب انتقال حرارت را تا ٦۰٪ در محدوده ای بطول ۳۰ a افزایش داد. a طول قاعده مثلث است. کاهش زاویه α از عوامل کاهش میزان تحریک، دوری مثلث از صفحه تخت، افزایش طول قاعده BC و کاهش عدد Re_x نیز، همگی از عوامل کاهش میزان تحریک در ضریب انتقال حرارت هستند.

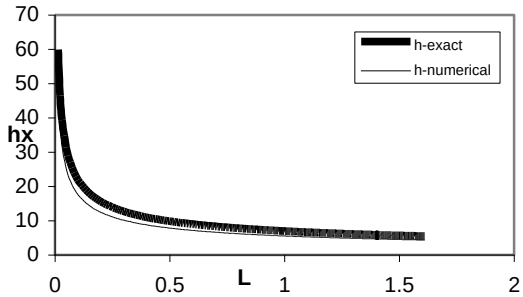
۶- شکل ها



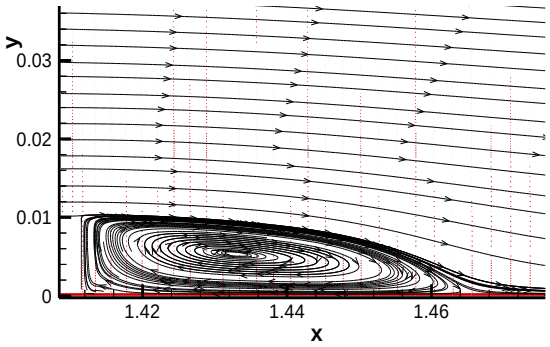
شکل (۱): نمایی نزدیک از شبکه بندی اطراف مانع و صفحه تخت



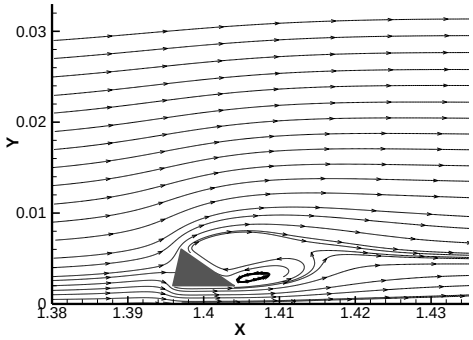
شکل (۲): نماد نقاط و علائم مهم در اطراف مانع مثلثی و موقعیت صفحه تخت



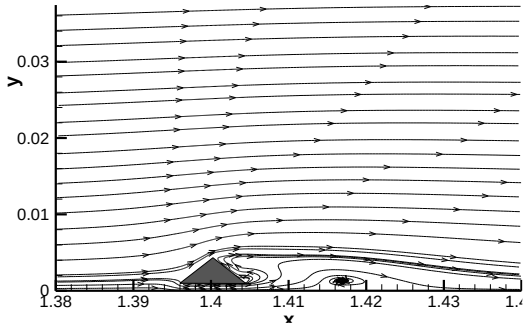
شکل (۳): آزمایش دقت کد عددی، مقایسه دقت پیش بینی ضریب انتقال حرارت از صفحه تخت شامل لایه آرام و درهم با نتایج دقیق



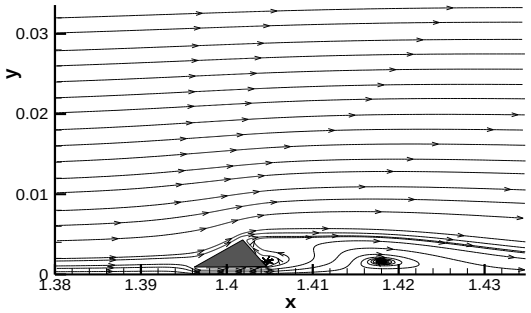
شکل (۴): آزمایش دقت کد عددی، نتایج عددی عبور جریان آشفته از روی پله و تشکیل گردابه و نقطه بازچسب



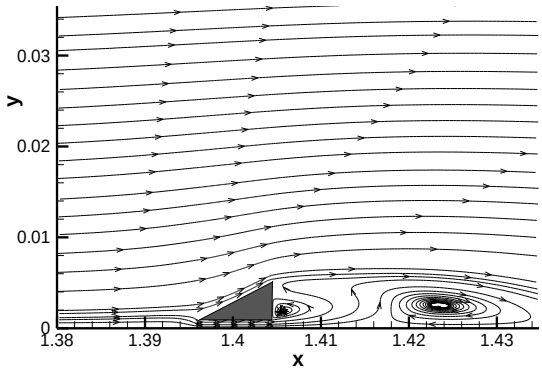
شکل (۵): خطوط جریان در اطراف مثلث با زاویه ۳۰ درجه



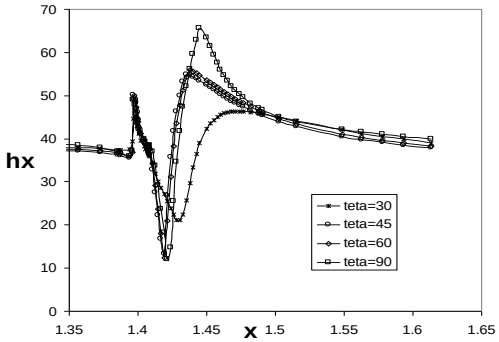
شکل (۶): خطوط جریان در اطراف مثلث با زاویه ۴۵ درجه



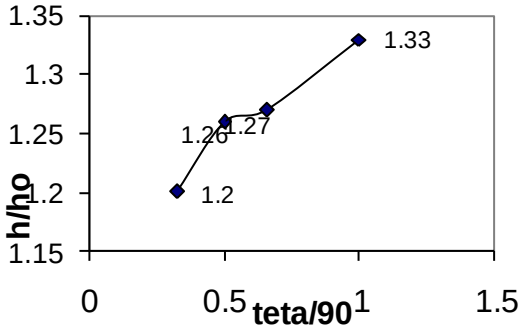
شکل (۷): خطوط جریان در اطراف مثلث با زاویه ۶۰ درجه



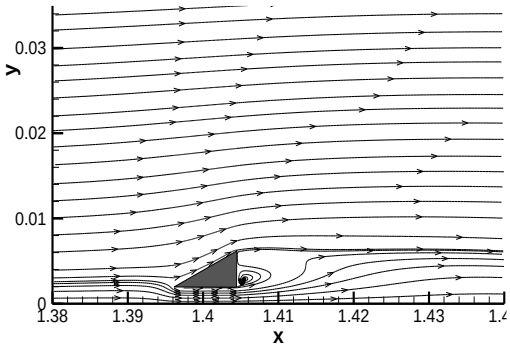
شکل (۸): خطوط جریان در اطراف مثلث با زاویه ۹۰ درجه



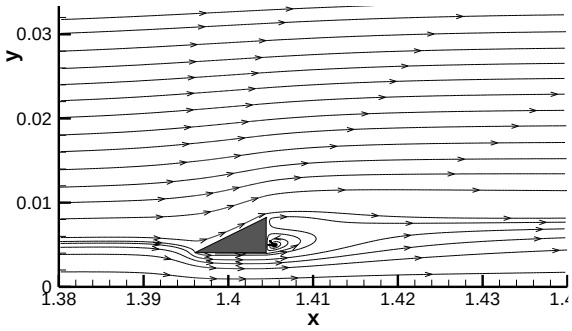
شکل(۹): اثر زوایه راس مانع مثلثی بر ضریب انتقال حرارت از صفحه تخت



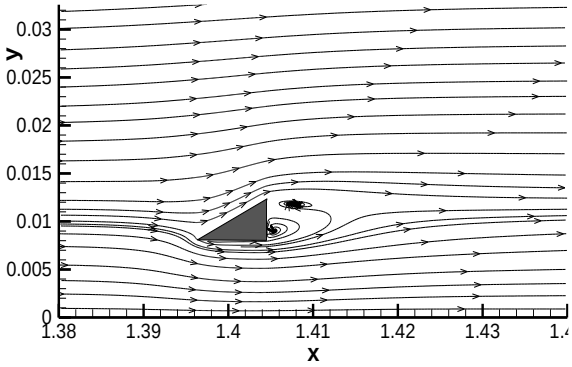
شکل (۱۰): نمودار بی بعد اثر زوایای مثلث بر ضریب انتقال حرارت



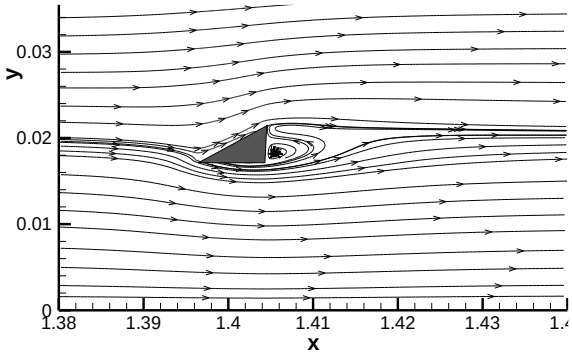
شکل(۱۱): خطوط جریان اطراف مقطع مثلثی با فاصله ۲mm از صفحه تخت



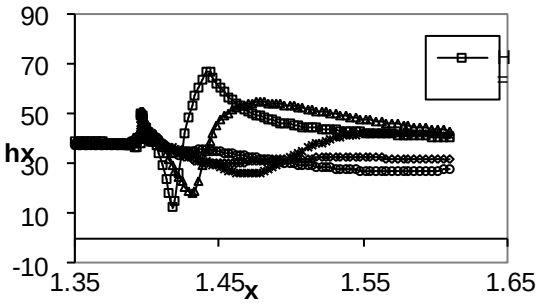
شکل(۱۲):خطوط جریان اطراف مقطع مثلثی با فاصله ۴mm از صفحه تخت



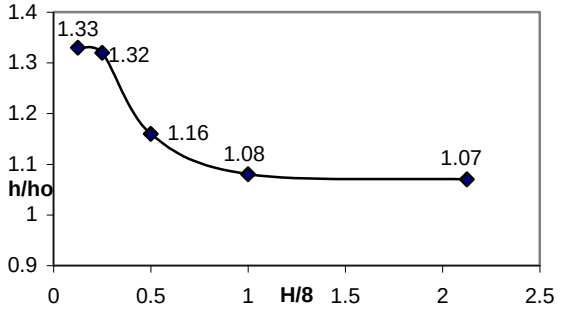
شکل(۱۳): خطوط جریان اطراف مقطع مثلثی با فاصله ۸mm از صفحه تخت



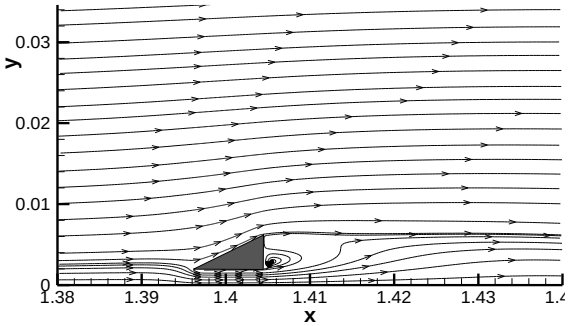
شکل(۱۴): خطوط جریان اطراف مقطع مثلثی با فاصله ۱۷mm از صفحه تخت



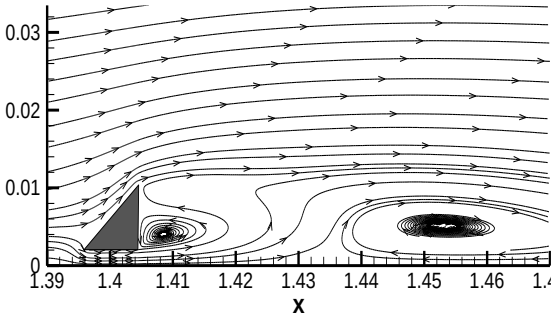
شکل(۱۵): نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت مثلث با فواصل مختلف از صفحه



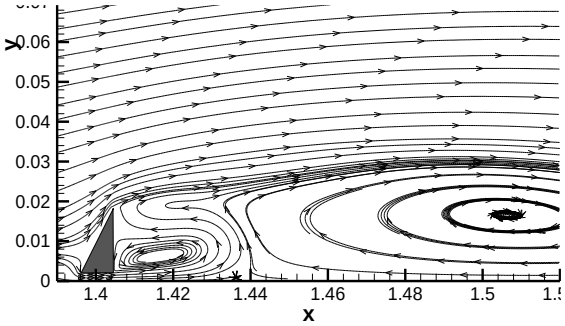
شکل (۱۶): نمودار بی بعد تغییرات ضریب انتقال حرارت مثلث با فواصل مختلف از صفحه



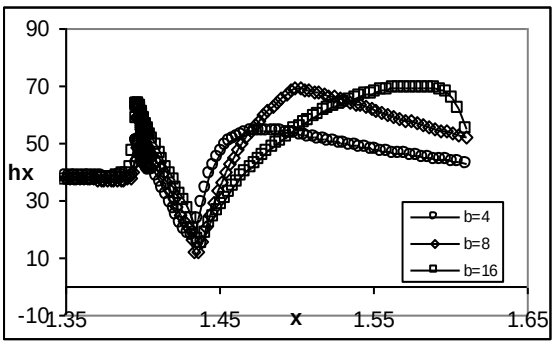
شکل(۱۷):خطوط جریان اطراف مانع مثلثی با ارتفاع ضلع ۴mm



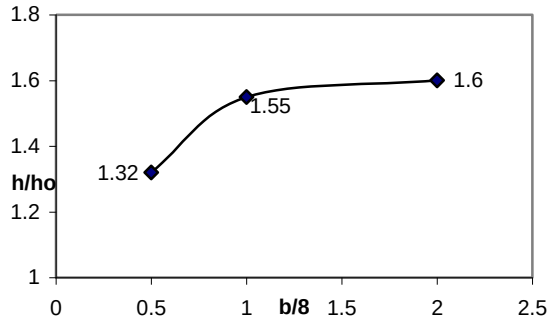
شکل(۱۸): خطوط جریان اطراف مانع مثلثی با ارتفاع ضلع ۸mm



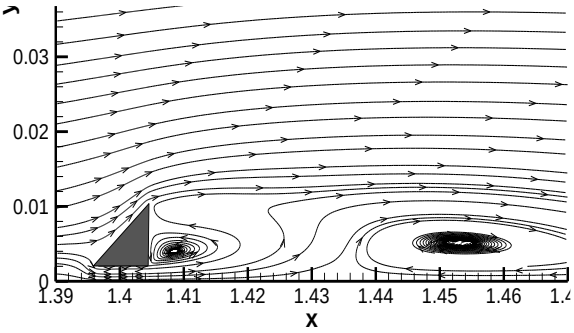
شکل(۱۹): خطوط جریان اطراف مانع مثلثی با ارتفاع ضلع ۱۶mm



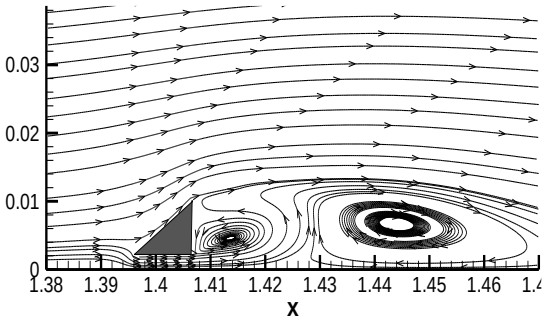
شکل (۲۰): نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت از صفحه مثلث با ارتفاعهای مختلف



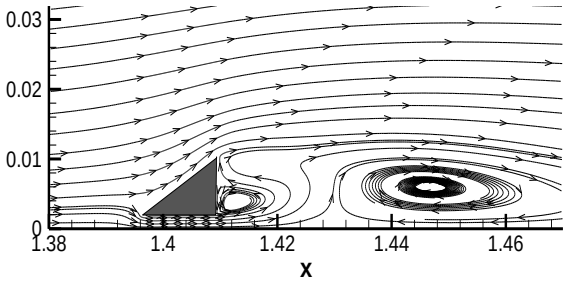
شکل(۲۱):تغییرات ضریب انتقال حرارت بدون بعد برای مثلث در فواصل مختلف از صفحه تخت



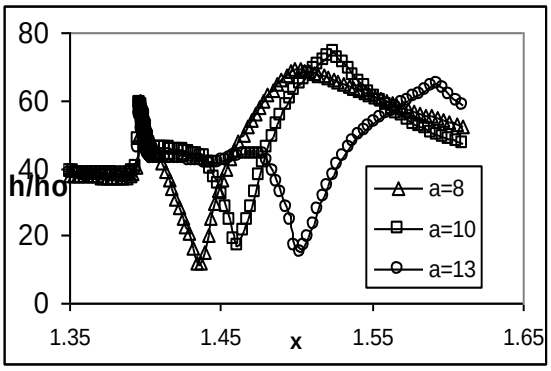
شکل(۲۲): خطوط جریان اطراف مثلث با طول قاعده ۸mm



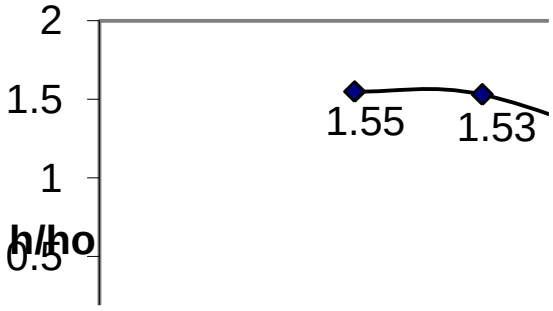
شکل(۲۳): خطوط جریان اطراف مانع مثلثی با طول قاعده ۱۰mm



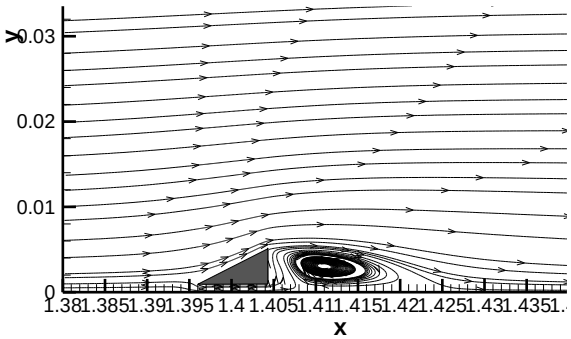
شکل(۲۴):خطوط جریان در اطراف مانع مثلثی با طول قاعده ۱۳mm



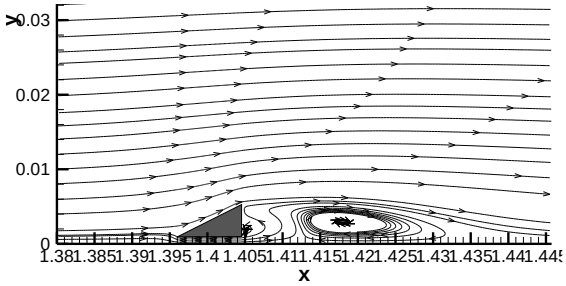
شکل(۲۵):توزیع تغییرات ضریب انتقال حرارت از صفحه تخت برای مانع مثلثی با قاعده های مختلف



شکل(۲۶):نمودار بی بعد تغییرات ضریب انتقال حرارت از صفحه مثلث با قاعده های مختلف

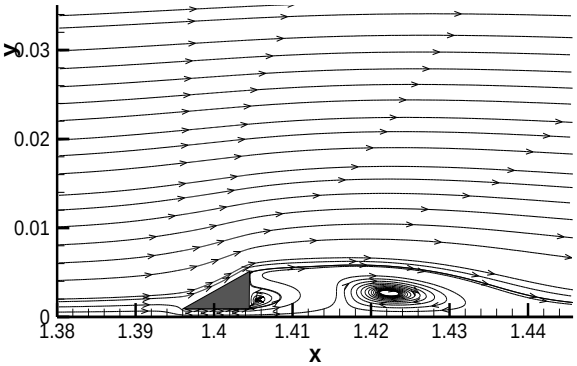


شکل(۲۷): نمودار خطوط جریان در اطراف مثلث با Re= ۱۱۶۰۰۰



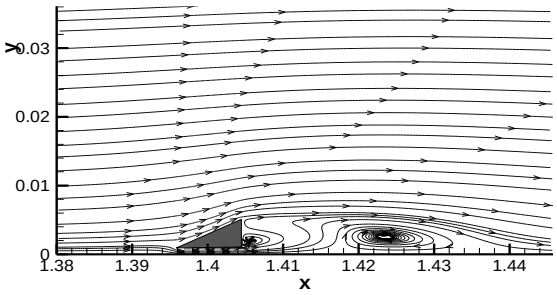
شکل(۲۸): نمودار خطوط جریان در اطراف مثلث با

Re=۴۶۶۰۰۰



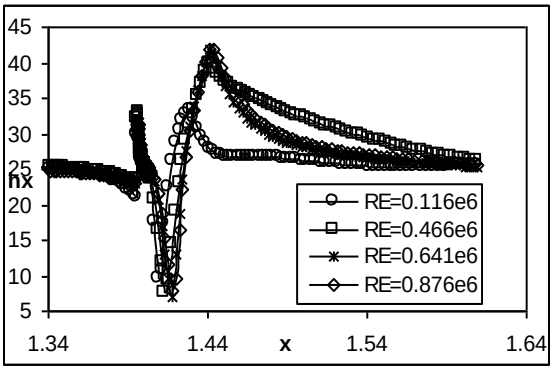
شکل(۲۹): نمودار خطوط جریان در اطراف مثلث با

Re=۶۴۱۰۰۰



شکل(۳۰): نمودار خطوط جریان در اطراف مثلث با

Re=۸۷۶۰۰۰



شکل(۳۱): نمودار اثر تغییرات رینولدز جریان بر ضریب انتقال حرارت از صفحه

۷- فهرست نمادها

طول اضلاع مانع مثلثی	a, b, c
نماد رئوس مانع مثلثی	A, B, C
زاویه راس متغیر	α
فاصله مانع از صفحه تخت	h
سرعت متوسط در هر نقطه	U
مولفه نوسانی سرعت در هر نقطه	u_i
لزجت فیزیکی	ν
لزجت گردابه ای	ν_t
متوسط درجه حرارت مطلق، درجه حرارت نسبی	T, θ
فاصله از دیواره، فاصله کنار دیواره	$y,\ y^+$

۸- مراجع

[۱] Schlichting H.,Gersten K. “Boundary Layer Theory” ISBN 3-540-66270, Springer-Verlag Berlin, [2000].

[۲] Franson Jens H.M. “Investigation of the Asymptotic Suction Boundary Layer” Sep 2001. Technical Reports from Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, SE-10044, Stockholm, Seweden.

[۳] Yarin A.L. “On the Mechanism of Turbulent Drag Reduction in Dilute Polymer Solutions: Dynamics of Vortex Filamenta” J. Non-Newtonian Fluid Mech., 69(1997) 137-153.

[٤] Gentry M.C., Jocobi A.M. “Heat transfer Enhancement by Delta-Wing Vortex Generators on a Flat Plate: Vortex Interaction with the Boundary Layer” Experimental Thermal and Fluid Science, 1997; 14:231-242 @Elsevier Science Inc.

[٥] Shiang W.P., Horng-wen W. “Buoyancy –Aided Opposed Convection Heat Transfer for Unsteady Turbulent Flow Across a Square Cylinder in a Vertical Channel” Int. J. of Heat and Mass Transfer. 50(2007)3701-3717.

[٦] Bahrami M.,Yovanovich M.,Culham J.R. “Convective Heat Transfer of Laminar, Single Phase Flow in Randomly Rough Microtubes” Proceedings of IMECE (2005), Nov. 5-11, 2005, Orlando.

[۷] Khallaki K., Russeil S. and Baudoin B. “Simulation of Formation Mechanism and Transport of Longitudinal Vortices in 3D Boundary Layer” Proceedings of Fifth International Conference on Enhancement, Compact Heat Exchangers. CHE 2005 – 58, Hoboken, NJ, USA, Sep. 2005.

[۸] فرهبد، علی و کهرم، محسن ؛ تحریک لایه مرزی توسط جت و ویک روی صفحه تخت و اثر آن بر ضریب انتقال حرارت، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، شهریور ۸۲.

[۹] محمودی، احمد رضا و کهرم، محسن ؛ بررسی تاثیر جت خالص بر تحریک لایهٔ مرزی روی صفحه تخت، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی،بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، شهریور ۸۲ **انتقال حرارت**، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، شهریور ۸۲.

[۱۰] Durbin P.A., Petterson Reif B.A. "Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows" 2001, John Wiley & Sons Ltd, England.

[۱۱] Glockner P.S., Naterer G.F. "Near-wall velocity profile adaptive shape functions for turbulent forced convection" Int. J. of Heat and Mass Transfer 32 (2005) 72-79.

[۱۲] Bosman C., Ahrabian D., Kahrom M. "General Consideration of Numerical Stability and Accuracy in Inviscid, Compressible Flow Calculations Employing primitive Variables" Int. J. for Numerical Methods in Fluids, Vol. 2, 123-149(1982)

[۱۳] Kahrom M., Farievar S., Haidarie A. "The Effect of Square Splittered and Unsplittered Rods in Flat Plate Heat Transfer Enhancement" Transaction A, Int. J. of Engineering, Vol. 20, Number 1, Feb 2007, Pages 86-87.

۹- زیرنویس ها

---

۱ Vortex Generator (VG)
۲ Reichardt
۳ Buffer layer
٤ Logarithmic Layer