

اثر فین های افقی در کنترل انتقال حرارت جابجائی آزاد لایه ای از صفحات قائم

محسن کهرم

دانشیار دانشکده مهندسی

دانشگاه فردوسی مشهد

E-mail: Kahrom_M@yahoo.com

چکیده:

انتقال حرارت از یک صفحه تخت قائم که بر روی آن فین های افقی با بلندی مشخص نصب شده اند مطالعه و چگونگی اثر گذاری این فین ها بر میزان انتقال حرارت از صفحه برای اعداد ریلی حدود $10^9 = Re_L$ بررسی شده است. ابتدا صحت انجام محاسبه ضریب انتقال حرارت، در شکل عمومی، با نتایج تجربی مقایسه و دقت محاسبات برنامه تایید می شود. سپس با بررسی رفتار جریان در اطراف فین، عوامل موثر در کاهش انتقال حرارت در چند عدد ریلی متفاوت، ولی در محدوده حرکت لایه ای، بررسی و نتایج مورد بحث قرار می گیرند. به دلیل وجود حرکات حساس لایه مرزی در اطراف نقطه سکون و پسگرده، همچنین تعدد فین های افقی، در محاسبات عددی از تقریب درجه دوم لایه مرزی حرارتی شده و ضریب انتقال حرارت را کاهش می دهد. افزایش عدد ریلی در محدوده حرکت لایه ای، افقی موجب تورم لایه مرزی حرارتی شده و ضریب انتقال حرارت را کاهش می دهد. افزایش عدد ریلی در محدوده حرکت لایه ای، تغییری در کیفیت نتیجه گیری فوق ایجاد نمی کند.

واژه های کلیدی: عدد ریلی، فین های افقی، جابجائی آزاد لایه ای، منطقه پسگرده (wake)، نقطه سکون

مقدمه:

تجهیزات کوچک صنعتی مانند قطعات الکترونیک و الکتریک و دیگ ها و کوره های کوچک که طول مشخصه آنها نیز کوچک است، به ندرت عدد ریلی از حدود $10^9 = Re_L$ تجاوز می کند. در چنین شرائطی نیروهای لزجی از قوام قابل ملاحظه ای برخوردارند و پراکنش ملکولی به اطراف را شدیداً کنترل می کنند و ضریب انتقال حرارت نیز به اندازه قابل توجهی در مقایسه با لایه های توربولنت کوچک تر است. با وجود این در بعضی موارد

جابجائی آزاد بخش قابل توجهی از موضوعات انتقال حرارت در تجهیزات صنعتی و خصوصاً اتلافات حرارتی در صنایع را تشکیل می دهد. کنترل میزان انتقال حرارت، هم به منظور کاهش ضریب انتقال حرارت و هم با هدف افزایش آن دارای ارزش صنعتی است و لازم است عوامل موثر در هر دو پدیده شناسائی شوند. در اختلاف درجه حرارت های یک میان یک دیواره و سیال اطراف آن و برای

کاستن از این ضریب برای کاهش اتلافات حرارتی باز هم دارای اهمیت است.

پهاونانی [۲] و همکاران از یک صفحه تخت که در زیر سطح فلزی آن و در فواصل مشخص مولدهای حرارتی الکتریکی و بر روی سطح آن فین های افقی نصب نموده بودند. برای مطالعه برخی از عوامل موثر در کاهش انتقال حرارت استفاده کردند. فین های افقی را با ارتفاع معلوم بر روی سطح بیرونی صفحه که در تماس با جابجائی آزاد هوا قرار می گیرند و در فواصل مساوی نصب نمودند. پس از حفظ درجه حرارت سطح، که عدد ریلی را حدود $10^9 = Ra_L$ قرار میداد، با ابزار دقیق اندازه گیری به روش اینترفرومتری توزیع درجه حرارت در لایه مرزی و از آنجا ضریب انتقال حرارت را محاسبه نمودند. نتایج آزمایشگاهی، اگرچه چگونگی تغییرات ضریب انتقال حرارت را در طول صفحه و در نگرش کلان آن، نشان می دهند، ولی به دلیل محدودیت هائی که از نظر اندازه گیری های آزمایشگاهی وجود دارد، امکان بررسی رفتار جریان و عوامل موثر بر این رفتار عموماً دشوار است. در روشی که در این مقاله بکار رفته است، ابتدا نتایج محاسبات برای شرایطی دقیقاً مانند آنچه باهوانانی انجام داده است، بدست می آید و از نظر کلی با نتایج باهوانانی مقایسه و پس از اطمینان از دقت مناسب برنامه، بررسی چگونگی رفتار جریان در نقاط حساس اطراف فین ها مورد مطالعه قرار می گیرد. این گونه آشکارسازی ها از نظر مهندسی در تصمیم گیری برای طراحی سیستم های انتقال حرارت دارای اهمیت است.

برخی آزمایشات نشان داده اند که بر آمدگی ها و زبری سطح از عوامل موثر بر افزایش ضریب انتقال حرارت در جابجائی آزاد هستند. بهر حال تعداد مقالات موجود در این زمینه نادر است و نتایج بدست آمده نیز، قانونمندی قابل استنادی را بدست نمی دهند.

جوهر و براون [۵]، بر روی سطح صفحه تخت گودی هائی مثلثی شکل ایجاد نمودند و سپس انتقال حرارت از صفحه را در جابجائی آزاد در حالتی که صفحه به حالت قائم قرار می گیرد، اندازه گیری نمودند. گزارش موجود نشان می دهد که در عدد $10^9 = Ra_L$ ضریب انتقال حرارت تا ۲۰۰٪

و در مقایسه با برخی آزمایشات دیگر تا ۱۰۰٪ نسبت به حالت مشابه برای سطح صاف افزایش می یابد.

شستری [۸]، بر روی بدنه خارجی یک استوانه حلقه هائی از سیم نازک با ضخامت های ۰/۴۵ تا ۱/۴۵ میلیمتر را پی در پی قرار می دهد، به شکلی که متوالیاً حلقه ها به یکدیگر چسبیده باشند. سپس ضریب انتقال حرارت جابجائی آزاد را در حالت قرارگیری قائم استوانه اندازه گیری نمود. نتایج آزمایش افزایش ۵۰٪ در مقدار ضریب انتقال حرارت را نشان می دهد.

این موضوع که کدام محدوده از اعداد ریلی تحرک بیشتری برای انتقال حرارت ایجاد می کند دارای اهمیت است و نتیجه ثابتی برای آن گزارش نشده است. پاراسولوف [۷]، نشان داد که برای سطحی که با ماشین کاری زبر نموده بود، بهترین تحریک و لذا بیشترین ضریب انتقال حرارت در محدوده $5 \times 10^4 < Ra_D < 5 \times 10^5$ به دست می آید. ادامه گزارش نشان می دهد که تحریک در ریلی های خارج از این محدوده نا محسوس است. دلائل این موضوع که چگونه فقط ناحیه مشخصی از عدد ریلی موثر بر افزایش انتقال حرارت است در گزارش مشخص نشده است.

آزمایشات دیگری توسط بوهاون و اندرسون [۴]، انجام شده است و نشان می دهد، برای صفحه قائمی که سطح آن کاملاً زبر شده است، عدد ریلی برای گذار به توربولنس تا نصف مقدار معمول برای آغاز توربولنس روی صفحه صاف در شرایط مشابه کاهش می یابد و لذا ضریب انتقال حرارت به میزان قابل توجهی افزایش خواهد داشت.

بدر [۱]، یک استوانه بیضوی را در حالت افقی ولی با زوایای مختلف برای قطر بزرگتر نسبت به افق در معرض جابجائی آزاد قرار می دهد. در شرایط مساوی ولی در زوایای مختلفی که قطر بزرگ با افق می سازد، ملاحظه می کند که ضریب انتقال حرارت هنگامی که این زویه به ۹۰ درجه می رسد ماکزیمم می شود.

بیجان [۲] و همکاران، سعی نمودند از تاثیر تحریکی لایه های مرزی بر یکدیگر، اثر آنها را بر ضریب انتقال حرارت بدست آورند. در یک آزمایش نشان دادند که وجود نوارهای باریک که بصورت تناوبی نسبت به یکدیگر قرار گیرند موجب افزایش ضریب انتقال حرارت خواهند شد و

فواصل بهین میان این نوارها را بدست آوردند. در آزمایش عددی دیگر با قرار دادن استوانه ها بصورت تناوبی نسبت به یکدیگر فواصل مناسب برای ضریب انتقال حرارت بهینه را برآورد نمودند.

باهاونانی و برگلس [۳]، یک صفحه تخت به طول ۰/۱۷۷۸ متر را که در روی سطح آن محل قرارگیری ۶ فین افقی با فواصل مساوی یک اینچ را پیش بینی نموده بودند، برای حالت قائم در جابجائی آزاد مورد مطالعه قرار دادند. روش اندازه گیری استفاده از لیزر و جابجائی فرینج های نیوتون در اثر تغییر طول ظاهری مسیرهای رفت و برگشت نور تک رنگ در لایه مرزی است (روش اینترفرومتری ماخ زیندر Mach-Zehnder Interferometer یا به اختصار MZI). در نتیجه تداخل امواج در مقاطع مشخصی از مسیر، متناوباً زمینه های تاریک و یا روشن ایجاد می شوند. هر مسیر پیوسته از زمینه تاریک (یا روشن) متعلق به لایه ای با خواص مشترک فیزیکی می باشد که با دنبال کردن آنها تحول در لایه مرزی قابل قیاس است. به کمک همین فرینج ها، می توان درجه حرارت در لایه های مختلف را قیاس نمود و ضریب انتقال حرارت را محاسبه کرد.

با وجود اندازه گیری های دقیق باهاونانی، برآورد عوامل موثر در تغییرات ضریب انتقال همچنان مبهم باقی می ماند. و این ابهام از خصوصیات بسیاری از روش های آزمایشگاهی است.

در این مقاله، یک برنامه کامپیوتری که دقت و صحت اندازه گیری آن در مقایسه با یکی از نتایج باهاونانی کنترل خواهد شد، فرآیند اثر گذاری فین های افقی بر انتقال حرارت از دیوار تخت را پیش بینی می کند و سپس ضمن مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، رفتار ریز ساختار لایه مرزی در کاهش انتقال حرارت بررسی می شود.

طرح مسئله

برای حفظ شرائط عمومی محاسبات با ابعاد استفاده شده در مرجع [۳]، یک صفحه تخت به طول ۰/۱۷۷۸ متر که در یک طرف آن فین های افقی با فواصل مساوی ۰/۰۲۵۴ متر از یکدیگر نصب شده اند، در نظر گرفته می شود. در طرف دیگر نیز، یک صفحه تخت صاف برای ایجاد امکان انجام یک مقایسه دائمی فرض شده است.

در این مقاله همچنین اثر تغییرات درجه حرارت سطح فین دار که از ۵۵ درجه سانتیگراد تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد افزایش داده می شوند (حدود ممکن در کاربردهای صنعتی)، برای مقایسه با نتایج آزمایش باهاونانی و چگونگی اثر تغییرات درجه حرارت در محدوده فوق، بر تحولات لایه مرزی مورد بررسی قرار می گیرند.

معادلات حاکم

معادلات بقاء جرم، مومنتوم و انرژی که برای جابجائی آزاد اصلاح شده اند برای تحول پایدار حل می شوند. هر دو مولفه مومنتوم در فضای محاسباتی فعال هستند. به دلیل وجود منطقه پسگرده، وجود نقطه سکون که موجب پرش در لایه مرزی و دوباره چسبانی آن به سطح می شود و هردو از عوامل ایجاد مناطق گردابی هستند. استفاده از هر دو مولفه معادلات مومنتوم لازم است. بنابراین معادلات حاکم به شرح زیر هستند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0.$$

معادلات مومنتوم:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v + g\beta(T - T_{\infty})$$

معادله انرژی:

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \alpha \nabla^2 \theta$$

در معادلات فوق، مقدار θ جایگزین تغییرات نسبی درجه حرارت شده است.

شرایط مرزی

هر دو مولفه سرعت در روی سطح صفحه و فین ها صفر و مقدار درجه حرارت روی صفحه مناسب با مقدار عدد

$Ra_L = 10^9$ فرض می شوند. فضای محاسباتی با ابعادی در نظر گرفته شده است که در طرفین فضا مقدار سرعت کمتر ۰/۰۰۱ مقدار ماکزیمم سرعت در اطراف صفحه داغ باشد. مقدار فشار، بر روی مرز دو طرف اتمسفریک و درجه حرارت محیط ۲۰ درجه سانتیگراد فرض شده اند که همگی با شرایط آزمایشگاهی اشاره شده توسط باهاونانی برابر است. همچنین:

در امتداد ،

$$I=1 \text{ and } I=NX$$

مقادیر

$$\begin{aligned} \text{Grad } u &= 0. \\ \text{Grad } v &= 0. \\ \text{Grad } p &= 0. \\ \text{Grad } T &= 0. \end{aligned}$$

همچنین برای $I=1$ و $I=NX$

$$T = T_{\infty} , P = P_{\infty}$$

روش حل معادلات

شبهه حل معادلات تا فاصله $2q$ (به شکل ۲ توجه کنید) از سطح صفحه به هر طرف با فواصل مساوی $q/10$ در امتداد محور x ، شبکه بندی شده است . پس از آن تا انتهای فضای محاسباتی این فاصله بکمک رابطه زیر انبساط داده شده است :

$$s = P\eta^* + (1-P)\left(1 - \frac{\tanh\{Q(1-\eta^*)\}}{\tanh Q}\right)$$

که در این رابطه $Q=2$ و $P = 0.85$ در فرض می شود و مقدار η^* بصورت زیر فرض می شود :

$$\eta^* = \frac{\eta - \eta_1}{\eta_{NX} - \eta_1}$$

در امتداد y فواصل یکنواخت و برابر $q/4$ انتخاب شده اند . انتخاب فواصل به شکل فوق در سه دوره سعی و خطا بدست آمده و حساسیت های منطقه پسگرده ، خصوصاً با این انتخاب ، با وضوح بهتری نمایان می شود . تعداد کل گره های استفاده شده در حل نهائی حدود ۳۶۰۰۰ نقطه است . نمایش این شبکه بصورت تصویر در ابعادی که دارای وضوح کافی باشد در متن مقاله میسر نبوده است .

هر یک از معادلات بقاء به شکل کلی زیر فرض می شوند :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i\phi) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i}\right) + S \end{aligned}$$

مقدار ϕ ممکن است مولفه های سرعت برای ممنتوم یا درجه حرارت θ برای معادله انرژی باشد . مقدار Γ ضریب نفوذ (Diffusion Coeff.) و مقدار S برای جابجایی آزاد در معادله ممنتوم ، نیروی غوطه وری فرض

می شود . شکل کلی معادله فوق پس از اعمال روش تفاضلی و مدل QUICK با وزن بالادستی جریان ، برای هر نقطه مانند P بصورت زیر نوشته می شود :

$$\begin{aligned} a_p\phi_p = a_{EE}\phi_{EE} + a_E\phi_E + a_{WW}\phi_{WW} \\ + a_W\phi_W + a_{NN}\phi_{NN} + a_N\phi_N \\ + a_{SS}\phi_{SS} + a_S\phi_S + b \end{aligned}$$

مقدار b شامل مقادیر ثابت در لحظه محاسبه برای

نقطه P است :

$$b = S_c \Delta x \Delta y + a_p^0 \phi_p^0$$

$$a_p^0 = \frac{\rho \Delta x \Delta y}{\Delta t}$$

ϕ_p^0 ، مقدار در نقطه P در دور قبلی محاسبه فرض شده است .

نتایج و جمع بندی

نتایج محاسبات عددی برای فین های با ارتفاع $\frac{1}{8}$ اینچ و

فاصله فین ها یک اینچ از یکدیگر نشان می دهد که :

۱- روش عددی تفاضل محدود با دقت درجه دوم با شبکه بندی مستطیلی پس از مقایسه با روش اندازه گیری MZI است ، نشان می دهد که از دقت خوبی در محاسبات برخوردار است و می تواند با وجود هفت نقطه سکون و هفت منطقه پسگرده (wake) روند تحول را با دقت خوبی تحلیل کند ، (شکل ۳) .

۲- وجود فین های افقی روی صفحه تخت ، ضخامت لایه را میان دو فین متوالی افزایش می دهد و با کاهش گرادیان دما ، ضریب انتقال حرارت نیز کاهش می یابد ، (شکل های ۴ و ۵) ، شیب تغییرات درجه حرارت را برای دو فین اول و دو فین آخر نمایش می دهد .

۳- مقدار عمده کاهش گرادیان دما در بالادست هر فین (در نقطه سکون) و پایین دست آن (در منطقه پسگرده) بوجود می آید و در نقاط نزدیک به وسط فاصله میان دو فین ، این کاهش تا حدودی ترمیم می شود ، (شکل های ۵ و ۶) . این پدیده را می توان در نمایش تغییرات ضریب انتقال حرارت h نیز ، ملاحظه نمود (شکل ۳) .

۴- روی سطح نوک فین ها گرادیان درجه حرارت در ابتدا بسیار تند و به تدریج به سمت پایان دست آن کاهش می یابد . (شکل های ۵ و ۶) . وجود همین گرادیان جهش تند

در مقدار ضریب انتقال حرارت موضعی در شکل ۳ را نمایش می دهد .

۵- در شکل های ۷ و ۸ ، آنچه را که برای توزیع دما شرح داده شده است برای توزیع سرعت در اطراف فین ها نشان می دهد . سرعت برای منحنی های بسته پشت مناطق wake کمتر از 0.001 متر بر ثانیه و در لبه ورودی نوک فین ها بیشترین (حدود 0.5 متر بر ثانیه) است .

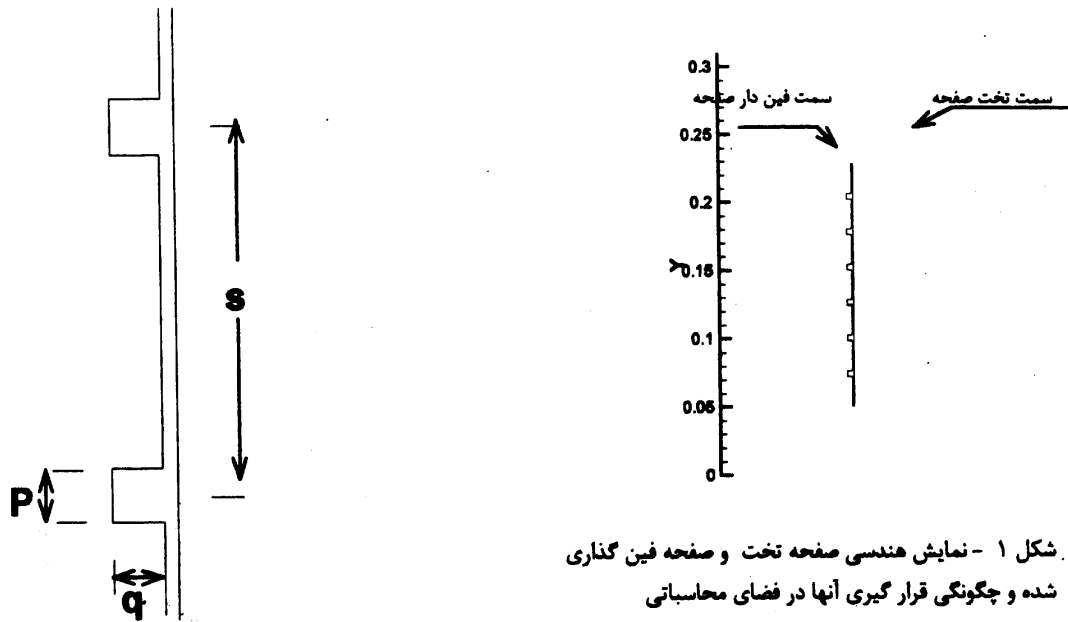
۶- در شکل ۹ تغییرات ضریب انتقال حرارت برای سمت تخت صفحه و سمت فین دار با یکدیگر مقایسه شده اند . ملاحظه می شود که بطور کلی ضریب انتقال حرارت برای سطح فین گذاری شده کمتر از مقدار مربوط برای صفحه تخت است . و در برخی نقاط به حدود نصف آن کاهش می یابد .

۷- روند کلی تغییرات درجه حرارت و سرعت چنین است که در سمت تخت در یک فاصله ثابت از لبه آغازین صفحه تخت ، ضمن حرکت به سمت پائین دست جریان ، هم دما و هم سرعت افزایش می یابند . یعنی گرادیان درجه حرارت

کاهش می یابد و یا می توان گفت ضریب انتقال حرارت در حال کاهش است . جدول های ۴ و ۵ بکمک شکل ۱۰ همین مفهوم را بکمک مقادیر برداشته شده از دو طرف صفحه بدست می دهند .

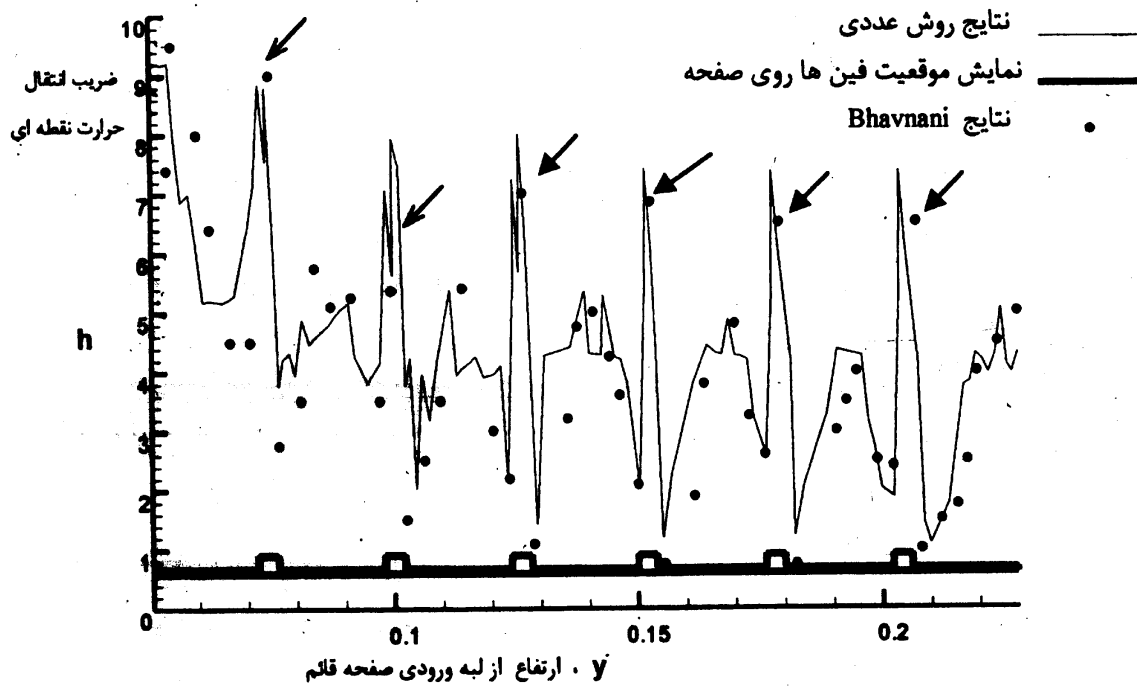
در سمت فین دار ، باز هم با اندازه گیری های سرعت و درجه حرارت در همان مقاطع تعیین شده و در همان فاصله از سطح صفحه ، اولاً ملاحظه می شود که گرادیان درجه حرارت بهر حال کمتر از مقدار متناظر در سمت صفحه تخت است . ثانیاً همین مقدار نیز در مقطع نقطه سکون بسیار کمتر و در منطقه ویک کمتر از منطقه آزاد میان دو فین متوالی است .

۸- با افزایش درجه حرارت گرادیان درجه حرارت (و لذا ضریب انتقال حرارت) در هر دو طرف افزایش می یابد . ولی بهر حال اولاً درجه حرارت در سمت فین دار کمتر از سمت تخت است و ثانیاً در نقطه سکون کمترین و در منطقه پسگرده کمتر از ناحیه آزاد میان دو فین می باشد .



شکل ۱ - نمایش هندسی صفحه تخت و صفحه فین گذاری شده و چگونگی قرار گیری آنها در فضای محاسباتی

شکل ۲ - نمایش دو فین متوالی در یک طرف و صفحه تخت در طرف دیگر، نام گذاری فواصل.



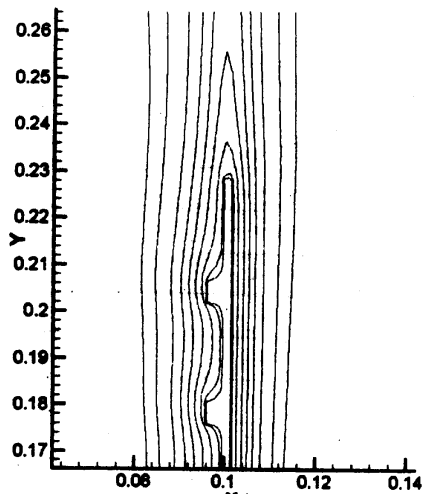
شکل ۳ - نمایش تغییرات ضریب انتقال حرارت نقطه ای روی صفحه تخت قائم

الف - نتایج عددی (پژوهش این مقاله) ، ب - نتایج اندازه گیری

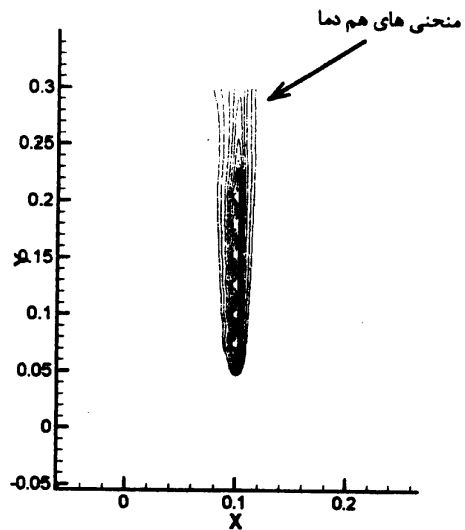
ج - نمایش موقعیت فین ها روی صفحه قائم برای سهولت

بررسی رفتار ضریب انتقال حرارت در طول صفحه

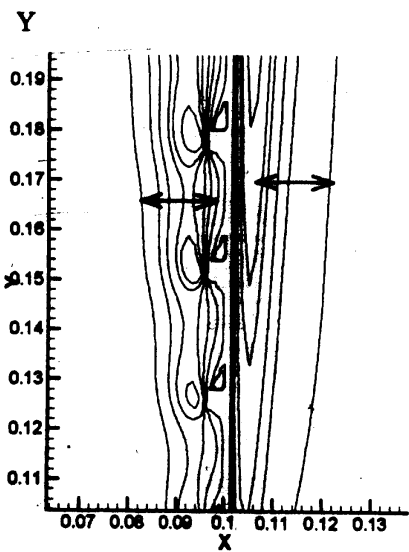
$Ra_L = 10^9$ ، ارتفاع از لبه صفحه است .



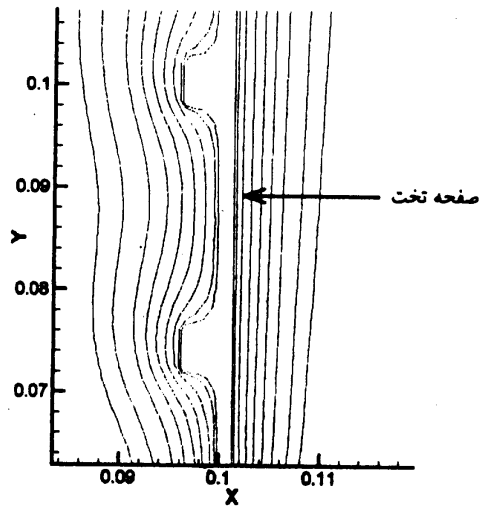
شکل ۶ - فین های پنجم و هشتم در انتهای مسیر جابجایی آزاد



شکل ۴ - نمایش منحنی های توزیع دما در اطراف صفحه قائم ، در سمت چپ صفحه فین های افقی گرادیان درجه حرارت بزرگتری را برای عبور جریان ایجاد کرده اند . می توان توزیع دما را در مقایسه با رفتار جریان در سمت راست ، صفحه تخت ، ملاحظه نمود .



شکل ۷ - توزیع سرعت در اطراف فین های شماره ۲، ۱ و ۳ از ابتدای صفحه . مقدار سرعت در گردابه های تشکیل شده بعد از هر سه فین ۰/۰۰۰۹۹ متر بر ثانیه است . که منطقه کم فعالیت از نظر جابجایی را نشان می دهد . در مقابل در نک فین ها و بقیه مناطق مشخص شده توزیع سرعت به شرح جدول ۲ است :



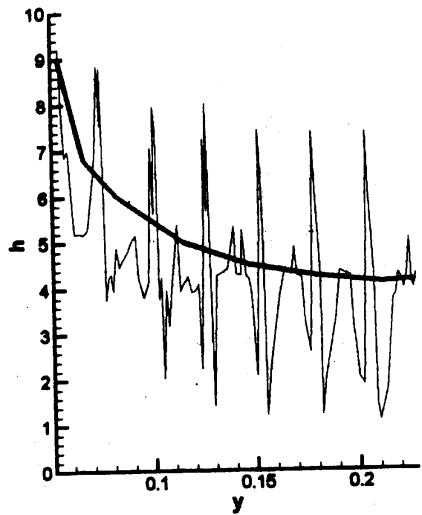
شکل ۵ - بزرگمائی توزیع درجه حرارت در اطراف فین یکم و فین دوم . بین دو فین و سطح انتهایی فین ، گرادیان درجه حرارت بیشتر از سمت بالا دست و پایین دست فین است .

جدول ۱ - دما برای هریک از منحنی های شکل ۵ . شماره منحنی ها از بیرون به سمت داخل و برای هردو طرف مورد نظر است .

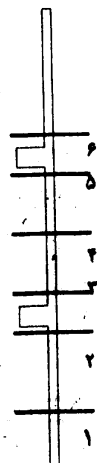
۲۱۴/۵	منحنی ششم	۲۹۵K	منحنی یکم
۳۱۹/۰۴	منحنی هفتم	۲۹۷/۴۲۴	منحنی دوم
۳۲۳/۶۸	منحنی هشتم	۳۰۱/۷	منحنی سوم
۳۲۵/۷	منحنی نهم	۳۰۵/۹۵	منحنی چهارم
-	-	۳۱۰/۷۴	منحنی پنجم

جدول ۲ - شرح توزیع سرعت در اطراف صفحه برای شکل ۷. جهت شمارش منحنی ها برای هر صفحه از بیرون به طرف سطح همان صفحه است. واحد سرعت متر بر ثانیه

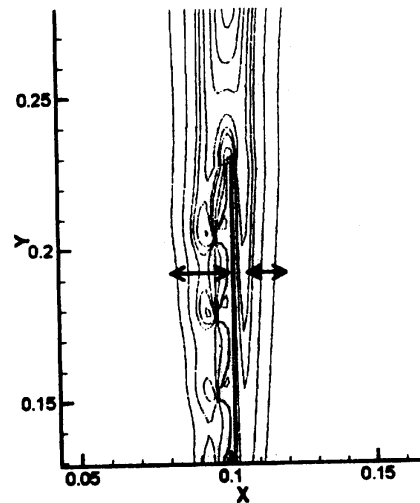
شمارش منحنی	سطح فین دار	سطح تخت
۱	۰/۰۸۲۷	۰/۰۸۲۷
۲	۰/۱۲۲۸	۰/۱۲۱
۳	۰/۱۵۰	۰/۱۵۳
۴	۰/۱۸۰	۰/۱۷۷
۵	۰/۱۸۱	۰/۱۹۸۶۷
۶	۰/۱۵۵۳	-
۷	۰/۱۲۲۴	-
۸	۰/۰۷۹۴	-
۹	۰/۰۲۹۴	-



شکل ۹ - مقایسه نسبی تغییرات ضریب انتقال حرارت برای صفحه تخت با صفحه مجهز به فین های افقی



شکل ۱۰ - فین پنجم و ششم (از پایین به بالا) برای بررسی اثر افزایش درجه حرارت دیواره بر عملکرد فین های افقی انتخاب شده اند. خطوط کوتاه افقی مقطعی را که برای مقایسه انتخاب شده اند نمایش می دهند. با انتخاب این مقاطع یک دور کامل از تاثیرگذاری متقابل قسمت تخت، سکون و ویک بر یکدیگر برای سنجش در اختیار قرار دارند. مقایسه رفتار جریان در جدول ۴ قابل ملاحظه است.



شکل ۸ - تغییرات سرعت در اطراف فین های ۵، ۶ و ۷ مقدار سرعت مربوط به هر منحنی در جدول ۳ داده شده است.

جدول ۳ - مقادیر سرعت روی منحنی های توزیع سرعت در شکل ۸. شمارش از بیرون به سمت سطح هر صفحه

شمارش منحنی	سطح فین دار	سطح تخت
۱	۰/۱۰۷۷	۰/۸۰۸
۲	۰/۱۵۶	۰/۱۵۷
۳	۰/۲۰۲۶	۰/۲۰۳
۴	۰/۲۰۲۹	۰/۲۲۰۵
۵	۰/۱۵۴	-
۶	۰/۱۱۰۱	-
۷	۰/۰۲۰۶	-

جدول ۴ - مقایسه تغییرات درجه حرارت در فاصله $\Delta x = \frac{1}{8}$ از سطح صفحه در مقاطع شماره گذاری شده در شکل ۱۰

$\Delta T = 155^\circ$		$\Delta T = 105^\circ$		$\Delta T = 75^\circ$		$\Delta T = 55^\circ$		شماره مقطع
سمت فین ها	صفحه تخت	سمت فین ها	صفحه تخت	سمت فین ها	صفحه تخت	سمت فین ها	صفحه تخت	
۳۷۹/۹۶	۳۶۰/۷	۳۵۰/۶۵	۳۳۵/۹۸	۳۲۴/۲۶	۳۱۸/۸	۳۱۶/۸	۳۱۱/۱۸	۱
۴۰۰/۰	۳۶۱/۰	۳۶۶/۵۶	۳۳۶/۴۵	۳۳۴/۹۴	۳۱۹/۰۶	۳۲۱/۹۳	۳۱۱/۳۷	۲
۴۰۳/۱	۳۶۱/۲	۳۷۳/۴۶	۳۳۶/۸۹	۳۳۹/۴۳	۳۱۹/۳۲	۳۲۳/۶۷	۳۱۱/۵۶	۳
۴۸۱/۳	۳۶۱/۶۴	۳۵۱/۱	۳۳۷/۶۸	۳۲۵/۰	۳۱۹/۷۶	۳۱۷/۱۴	۳۱۱/۸۷	۴
۳۹۶/۸	۳۶۲/۰	۳۶۷/۴۴	۳۳۷/۸۵	۳۳۱/۶۸	۳۱۹/۸۷	۳۲۰/۳	۳۱۱/۹۷	۵
۴۰۸/۰	۳۶۲/۳	۳۷۳/۵۲	۳۳۸/۱۸	۳۳۹/۸۸	۳۲۰/۰۷	۳۲۳/۸	۳۱۲/۱۱	۶

جدول ۵ - مقایسه تغییرات سرعت در فواصل معین $\Delta x = \frac{1}{8}$ از سطح صفحه در مقاطع شماره گذاری شده در شکل ۱۰ (متر بر ثانیه)

$\Delta T = 155^\circ$		$\Delta T = 105^\circ$		$\Delta T = 75^\circ$		$\Delta T = 55^\circ$		شماره مقطع
سمت فین ها	صفحه تخت	سمت فین ها	صفحه تخت	سمت فین ها	صفحه تخت	سمت فین ها	صفحه تخت	
-۰/۲۷۹	-۰/۴۰۸	-۰/۲۲۷	-۰/۳۷۱۱	-۰/۱۶۸	-۰/۲۷۸۵	-۰/۱۳۴۶	-۰/۲۱۶۸	۱
-۰/۲۵۵	-۰/۴۱۹	-۰/۱۸	-۰/۳۸	-۰/۱۲۸	-۰/۲۸۴۸	-۰/۱۰۴۳	-۰/۲۲۲۴	۲
-۰/۲۱۴	-۰/۴۳	-۰/۱۹۴	-۰/۳۹	-۰/۱۳۹۴	-۰/۲۹۱	-۰/۱۰۸۷	-۰/۲۲۷	۳
-۰/۲۸	-۰/۴۵	-۰/۲۴۳	-۰/۴۰۶۷	-۰/۱۷۶	-۰/۳۰۲	-۰/۱۴۵۴	-۰/۲۳۷	۴
-۰/۲۴۵۴	-۰/۴۵۷	-۰/۲۲۲	-۰/۴۱۳۴	-۰/۱۵۸	-۰/۳۰۶	-۰/۱۳۰۸	-۰/۲۴۲۲	۵
-۰/۲۵۷۶	-۰/۴۶۳	-۰/۲۳۷	-۰/۴۲۲۳	-۰/۱۶۲۲	-۰/۳۱۲	-۰/۱۴۲۳	-۰/۲۴۸	۶

1 - Badr, H.M., "Laminar Natural Convection From Elliptic Tube With Different Orientation", ASME, Int. J. Of Heat and Mass Transfer, Nov. 1997, Vol. 119/709

2 - Bejan, A., Fowler, A.J., and Stancu, G., "The Optimal Spacing Between Horizontal Cylinders in a Fixed Volume Cooled by Natural Convection," Int. J. Heat Transfer, Vol. 38, pp.2047-2055, 1996

3 - Bhavnani, S.H. and Bergles, A.E., "Interferometric Study of Laminar Natural Convection from an Isothermal Vertical Plate with Transverse Roughness Elements," Current Research in Heat and Mass Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Edited by M.V.Krishna Murthy Et al, 1988

4 - Bohm, M., and Anderson, R., "Heat Transfer Enhancement in Natural Convection Enclosure Flows," SERI Report, Number SERI/TR-252-2103, Aug(1984).

5 - Jofre, R.J., and Barron, R.F., "Free Convection Heat Transfer To rough Plate", "ASME Paper NO. WA 67/HT-38, 1967.

6 - Ledezma, G.A., and Bejan, A., "Optimal Geometric Arrangement of Staggered Vertical Plates in Natural Convection," J. of Heat

Transfer, Transaction of the ASME NOV.1997, Vol.119/701.

7 - Parasolov, R.S., "On the Effects of Surface Roughness on Free Convection Heat transfer From a Vertical Tube," Presented at International Centre for Heat and Mass Transfer, Dubrovnik, Yugoslavia, 1976.

8 - Sastry, C.V.S.N. Murthy, V.N., and Sarma, P.K., "Effect of Discrete Wall Roughness on Free Convection Heat Transfer from a Vertical Tube" Presented at International Centre for Heat and Mass Transfer, Dubrovnik, Yugoslavia, 1976.