تحليل تجربي و عددي انتقال حرارت جابجايي آزاد از روي صفحه موجي شكل درون يک كانال عمودي

مهدي اشجعي[*۱] ، حسين شكوهمند[۲]، مهدي اميري[۳] و تورج يوسفی[۴]

[۱]دانشيار دانشكده مهندسي مكانيک ـ پرديس دانشكده‌هاي فني ـ دانشگاه تهران

[۲]استاد دانشكده مهندسي مكانيک ـ پرديس دانشكده‌هاي فني ـ دانشگاه تهران

[۳]دانش آموخته كارشناسي ارشد مهندسي مكانيک ـ پرديس دانشكده‌هاي فني ـ دانشگاه تهران

[۴]استاديار گروه مهندسی مكانيک- دانشكده فنی و مهندسی- دانشگاه رازی كرمانشاه

(تاريخ دريافت ۸۴/۱۲/۲۰ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۵/۴/۲۶ ، تاريخ تصويب ۸۵/۷/۸)

چكيده

در اين تحقيق، مطالعه تجربي و عددي بر روي انتقال حرارت جابجايي آزاد داخل يک كانال عمودي كه از يک صفحه سينوسي و يک سطح صاف تشكيل شده، انجام پذيرفته است. ديواره سينوسي شكل در دماي ثابت بوده و ديواره ديگر بصورت صفحه تخت آديباتيک درنظر گرفته شده است. در مطالعه تجربي بر روي صفحه سينوسي شكل در فضاي آزاد، ضرايب انتقال حرارت محلي بر روي صفحه بر اساس روش تداخل سنج نوري ماک-زندر بدست آمده است. مطالعه عددي در نرم افزار Gambit مدلسازي و با استفاده از نرم افزار Fluent تحليل شده است. نتايج عددي به خوبي با نتايج تجربي مطابقت دارد. در اين بررسي پارامترهاي تغيير كننده عبارتند از عدد رايلي صفحه ، Ra_l و فاصله دو ديواره كانال. بررسي ها براي صفحه با نسبت دامنه به طول موج α= ۰/۰۵ در هشت عدد رايلي مختلف و ۱۸ فاصله مختلف ديواره انجام شده است. نتايج نشان مي دهد كه فركانس تغيير ضرايب انتقال حرارت محلي براي صفحه در فضاي آزاد برابر فركانس خود صفحه مي باشد. به علاوه با افزايش عدد رايلي ضريب انتقال حرارت متوسط افزايش مي يابد. براي هر عدد رايلي يک فاصله ديواره بهينه وجود دارد كه نرخ انتقال حرارت از روي صفحه سينوسي شكل بيشينه خواهد شد. اين فاصله بهينه تابعي از عدد رايلي صفحه مي باشد. با افزايش عدد رايلي مقدار فاصله بهينه كاهش مي يابد.

واژه هاي كليدي: جابجايي آزاد - صفحه سينوسي شكل - كانال عمودي

مقدمه

مطالعه انتقال حرارت به روش جابجايي آزاد در بسياري از زمينه‌هاي صنعتي و فرآيندهاي طبيعي از اهميت خاصي برخوردار است. جابجايي آزاد در بسياري از مسايل كه انتقال حرارت به روش ديگري ممكن نمي‌باشد، بر روي نرخ انتقال حرارت محدوديت اعمال مي كند. در اينگونه مواقع به منظور بالا بردن ضريب ايمني، لازم است تا نرخ انتقال حرارت به روش جابجايي آزاد افزايش يابد. فرآيند انتقال حرارت جابجايي آزاد از روي صفحات عمودي ناصاف در كاربردهاي صنعتي به وفور به چشم مي‌خورد. اين صفحات ممكن است به كمك انواع مختلف المانها ناصاف شده باشند. يكي از مهمترين زمينه‌هايي كه انتقال حرارت جابجايي آزاد از روي صفحات ناصاف به چشم مي‌خورد، بردهاي الكترونيكي درون قطعات رايانه‌ای است. حرارت دفع شده از روي اينگونه مدارهاي الكترونيكي بر روي عملكرد آنها تأثير بسزايي دارد. در كاربردهاي ديگر كه صفحات گرم شده صاف مي‌باشند، لازم است تا نرخ حرارت دفع شده بالا رود تا به سطح دمايي مورد نظر برسيم. يك راه حل معمول اضافه كردن فين به صفحات است كه باعث بالا بردن ميزان انتقال حرارت خواهد شد. يكي ديگر از جاهايي كه انتقال حرارت به روش جابجايي آزاد در آن اتفاق مي‌افتد كندانسور يخچال هاي خانگي مي‌باشد. در اين گونه دستگاه ها، لوله هاي كندانسور را مي‌توان به صورت يك صفحه ناصاف عمودي مدل كرد كه انتقال حرارت از روي آن به روش جابجايي آزاد صورت مي‌گيرد.

صفحات سينوسي شكل تمام صفحات زبر ديگر را شامل مي‌شوند و مي‌توانند به عنوان تقريبي از هندسه‌هاي كاربردي ديگر كه مطالعه انتقال حرارت جابجايي آزاد از آنها مهم است، در نظر گرفته شوند. يك مثال آشنا در اين زمينه مي‌تواند فين هاي خنك كننده باشد. فين هاي

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۴۰۳۴ , فاكس : ۸۸۰۱۳۰۲۹ , Email: ashjaee@ut.ac.ir

خنك كاري سطح تبادل حرارت بيشتري نسبت به صفحات تخت دارند، بنابراين رفتار انتقال حرارتي آنها نسبت به صفحات صاف بهتر است. در بسياري موارد، صفحه مبادله كننده حرارت در مواجهه با يك صفحه ديگر مي‌باشد كه مسأله انتقال حرارت در يك كانال مطرح مي‌شود. در اين موارد صفحه مقابل تأثير بسزايي در ميزان نرخ انتقال حرارت از صفحه اصلي دارد و فاصله اين دو صفحه، نرخ انتقال حرارت از صفحه اصلي را كم يا زياد مي كند.

ياو [١] در سال ١٩٨٢ به صورت عددي انتقال حرارت جابجايي آزاد را از روي يك صفحه سينوسي شكل مورد بررسي قرار داد. او محاسبات خود را براي پراندل واحد $Pr = 1$ انجام داد. نتايج عددي نشان مي‌داد كه فركانس تغييرات نرخ انتقال حرارت محلي دو برابر فركانس صفحه سينوسي شكل است و دامنه نوسانات عدد نوسلت محلي از پايين تا بالاي صفحه بتدريج كاهش پيدا مي‌كند كه اين به سبب رشد فعاليت لايه مرزي حرارتي مي‌باشد. همچنين نتايج عددي كار ياو نشان داد كه عدد نوسلت كل در مقايسه با صفحه تخت عمودي كاهش پيدا مي‌كند. اما مبناي مقايسه او بطور صريح بيان نشده است. بهواني و برگلس [٢] در سال ١٩٨٨ با استفاده از روش تداخل سنج نوري ماك – زندر مطالعه تجربي بر روي نرخ انتقال حرارت جابجايي آزاد از روي صفحات سينوسي شكل انجام دادند. آنها پارامترهايي نظير نسبت دامنه به طول موج صفحه و زاويه قرار گيري صفحه را تغيير دادند و تأثير آنها را بر نرخ انتقال حرارت بررسي كردند. نتايج كار تجربي اين دو كاملاً متفاوت از كار عددي ياو [١] در سال ١٩٨٢ بود. آنها مشاهده كردند كه فركانس تغييرات ضريب انتقال حرارت جابجايي آزاد با فركانس صفحه سينوسي برابر است. نتايج تجربي نشان مي‌داد كه بازدهي حرارتي صفحات سينوسي شكل در نسبت دامنه به طول موجهاي كوچك با بازدهي صفحه تخت تفاوت چنداني ندارد. همچنين هر چه نسبت دامنه به طول موج صفحه افزايش مي‌يابد نرخ انتقال حرارت از روي صفحه كاهش مي‌يابد. اين مقايسه بر اساس سطح تصوير شده مساوي صفحات انجام شده است. آنها همچنين مشاهده كردند كه در نسبت دامنه به طول موج برابر ٠/٣ نشانه‌هايي از جريان آشفته ظاهر مي شود و لايه مرزي حرارتي در عدد گراشف حدود 2×10^{7} ناپايدار خواهد شد. بلافاصله بعد از كار تجربي بهواني و برگلس در سال ١٩٨٨، موليك و ياو [٣] در سال ١٩٨٩ مطالعه عددي برروي صفحات سينوسي انجام دادند. بررسي آنها برروي جريان جابجايي مختلط انجام شد تا علت اختلاف كار عددي ياو در سال ١٩٨٢ با كار تجربي بهواني و برگلس در سال ١٩٨٨ توضيح داده شود. آنها توضيح دادند كه علت اختلاف مربوط است به تأثير جريان اجباري هوا برروي صفحه سينوسي شكل. چنين جرياني توسط يك جسم گرم در يك اتاق با ديواره‌هاي سرد بوجود مي‌آيد. بعد از كار تجربي بهواني و برگلس و كار عددي ياو، مطالعات متعدد ديگري بر روي انتقال حرارت از صفحات سينوسي شكل با شرايط دمايي سطح متفاوت و براي سيالات مختلف انجام شد[١٢-٤] كه از توضيح آنها در اينجا خودداري مي‌شود.

سرانجام ياو [١٣] در سال ٢٠٠٥ مطالعه عددي تحت عنوان بررسي انتقال حرارت جابجايي آزاد از روي صفحات موجي با هندسه پيچيده انجام داد. مهمترين نتيجه گيري او اين بود كه نرخ انتقال حرارت كل[1] از روي صفحات موجي شكل با هر نوع هندسه‌اي، از نرخ انتقال حرارت صفحه تخت بيشتر است و اين وابسته به نسبت دامنه به طول موج صفحه است. از طرف ديگر نرخ انتقال حرارت متوسط از روي صفحات سينوسي شكل به ازاء واحد سطح يكسان نسبت به صفحه تخت عمودي كمتر است. اما آنچه در طراحي مبدلهاي حرارتي مهم است نرخ كل انتقال حرارت از روي صفحه است.

مطالعات گسترده و وسيع قبلي كه بر روي انتقال حرارت جابجايي آزاد از صفحات موجي شكل انجام شده نشان دهنده اهميت اين موضوع در صنايع و پديده هاي فيزيكي محيط اطرافمان است. در اين پروژه سعي شده تا انتقال حرارت جابجايي آزاد از روي صفحه سينوسي شكل درون كانال با فاصله ديواره هاي متغير بررسي گردد.

مطالعه عددي

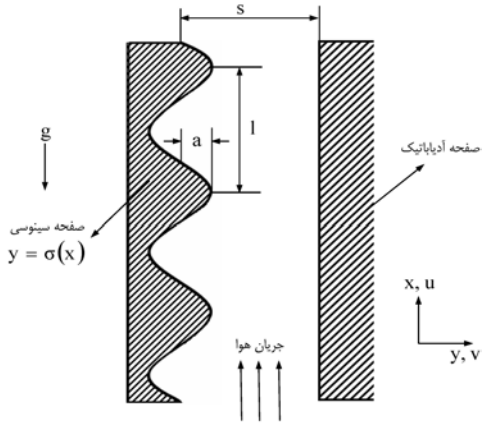
يک صفحه موجي شكل عمودي نيمه بينهايت مانند شكل (١) را درنظر بگيريد.

معادله صفحه موجي شكل با رابطه زير بيان مي شود:

$$y = \sigma(x) = a \cdot \sin\left(\frac{2\pi\, x}{l}\right) \qquad (١)$$

كه در آن a دامنه صفحه سينوسي و l طول موج آن است. مركز مبدأ مختصات در لبه پايييني صفحه قرار داده

شده است.



شكل ١ نمايي از صفحه سينوسي شكل و ديواره آدياباتيک مقابل آن.

صفحه در دماي ثابت T_w بزرگتر از دماي محيط قرار گرفته است. u و v بترتيب سرعت در راستاي x و y هستند. دماي محيط نيز ثابت و برابر T_∞ فرض شده است. فرض ديگر اينست كه جريان پايدار بوده و خواص حرارتي بجز چگالي در ترم شناوري همگي ثابت هستند. معادلات حاكم براي جريان پايدار، آرام و غيرقابل تراكم بر روي يک سطح موجي شكل نيمه بينهايت عمودي با درنظر گرفتن تقريب بوزينسک به صورت زير مي باشد [١۴]:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0. \qquad (۲)$$

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\rho g\beta(T-T_\infty) \qquad (۳)$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \qquad (۴)$$

$$\rho c\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (۵)$$

كه در آن ρ چگالي، P فشار، μ ويسكوزيته ديناميكي، g شتاب گرانش، β ضريب انبساط حرارتي و k ضريب هدايت حرارتي سيال است. شرايط مرزي عبارتند از:

برروي ديواره سينوسي و آدياباتيک $u, v = 0$

برروي ديواره سينوسي $T = T_w$

برروي ديواره آدياباتيک $\partial T/\partial y = 0$

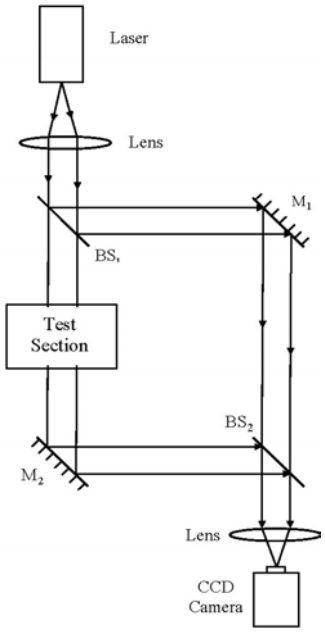
مرزهاي دور از ميدان حل $T = T_\infty$

براي حل معادلات حاكم از كد عددي فلوئنت استفاده شده است. مبناي حل معادلات در اين كد، روش حجم كنترل است كه به طور كامل در مرجع پتنكار[١۵] توضيح داده شده است. مدلسازي و شبكه بندي در نرم افزار گمبيت انجام شده است. در مدل كردن صفحات سعي شده است تا هندسه و شرايط مرزي طوري انتخاب شوند كه به شرايط فيزيكي و واقعي نزديک باشد. به همين منظور مدلسازي عددي صفحات سينوسي شكل با تمام جزئيات در يک محيط بزرگتر كه مرزهاي آن به اندازه كافي بزرگ انتخاب شده اند، قرارگرفته اند. براي حل معادلات در نرم افزار فلوئنت مدل دوبعدي با دقت مضاعف استفاده شده است. براي جداسازي معادلات در مورد ترم فشار مدل PRESTO ، در مورد ترم فشار- سرعت مدل SIMPLE و در مورد ترمهاي مومنتوم و انرژي مدل Second Order Upwind انتخاب شده است. همچنين تمام ضرايب فوق تخفيف برابر٠/٣ مقدارگذاري شده است. عدم وابستگي حل به شبكه نيز بررسي شده است.

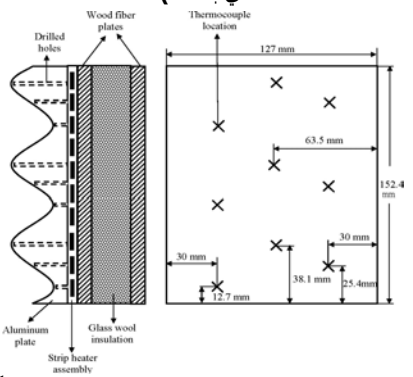
مطالعه تجربي

تداخل سنج مورد استفاده در كار حاضر از نوع ماک-زندر[٢] با قطر قطعات اپتيكي ١٠٠ mm است. منبع نور مورد استفاده در اين آزمايش از نوع نور ليزر هليوم-نئون با توان ١٠ mW و طول موج ۶٣٢/٨ nm $= \lambda$ مي باشد. اجزاء اصلي تداخل سنج ماک-زندر عبارتست از يک منبع نور ليزر همدوس، دو عدد عدسي محدب، دو عدد آينه تخت و دو عدد باريكه شكن (نيم آينه)و يک دستگاه دوربين CCD. تداخل سنج ماک –زندر مورد استفاده در كار حاضر كاملاً شبيه تداخل سنج مورد استفاده در كار تجربي اشجعي و همكارانش [١۶] مي باشد كه از توضيح مجدد آن در اينجا خودداري مي شود. در شكل (٢) نمايي ساده از تداخل سنج مورد استفاده در مطالعه تجربي ديده مي شود. صفحه سينوسي شكل از ورقه آلومينيوم ساخته شده كه بوسيله دستگاه وايركات به شكل سينوسي شكل درآمده است. طول صفحه سينوسي شكل ١۵٢/٤ mm بوده كه شامل سه موج سينوسي با طول موج ۵٠/٨ mm مي باشد. اندازه دامنه صفحه ٢/۵٤ بوده كه درنتيجه آن نسبت دامنه به طول موج ٠/٠۵ =α بدست مي آيد.

همچنين به منظور مقايسه نتايج كار تجربي حاضر با كار ساير محققين آزمايشي نيز بر روي صفحه تخت همدماي عمودي انجام شده است. طول صفحه تخت برابر mm ١١٣ و عرض آن در راستاي نور ليزر برابر mm ٣٨٠ مي باشد. ٩ سوراخ به قطر mm ٢ در سطح عقبي صفحات بگونه‌اي ايجاد شده كه تا فاصله تقريباً mm ١ از سطح جلويي پيشروي كرده‌اند. اين سوراخها محل قرار گيري ترموكوپلهايي هستند كه دماي سطح صفحه را ثبت مي كنند. سوراخها در سه رديف به فاصله mm ٣٠، mm ٦٤/٥ و mm ٩٧ از يك لبه جانبي ايجاد شده‌اند. ترموكوپلها از نوع K بوده كه بوسيله چسب اپوكسي در درون سوراخها ثابت شده‌اند. نمايي از اين صفحات و محل سوراخهاي ترموكوپل را مي‌توان در شكل (٣) مشاهده كرد.



شكل ٢ نمايي ساده از يک دستگاه تداخل سنج نوري ماک – زندر (M_1 و M_2 آينه هستند و BS_1 و BS_2 باريكه شكن مي باشند).



شكل ٣ نمايي ازصفحه سينوسي شكل و محل قرار گيري ترموكوپلها.

جمع آوري و آناليز داده‌ها

مطالعه عددي بر روي صفحه سينوسي شكل در هشت دماي سطح مختلف در محدوده دمايي $42^\circ C \le T_w \le 96^\circ C$ و ١٨ فاصله ديواره مختلف $s/a = 2/5, 3/5, \dots, \infty$ انجام شده است. همچنين مطالعه عددي بر روي صفحه تخت در يک دماي ثابت انجام شده است تا با نتايج تجربي مقايسه گردد. آزمايش های تجربي براي صفحه سينوسي شكل در پنج دماي مختلف سطح و براي صفحه تخت در يک دماي سطح انجام شده است. تمام نتايج تجربي از آناليز عكس هاي تداخل سنجي به دست مي‌آيند. عكس هاي تداخل سنجي توزيع كامل ميدان دمايي سيال و انتقال حرارت موضعي را در نزديكي سطح گرم بدست مي‌دهد. سپس از روي منحني توزيع دما برون يابي كرده و دماي سطح جسم و شار حرارتي روي سطح كه لازمه محاسبه ضريب انتقال حرارت است، بدست مي‌آيد. سپس مقاديرضريب انتقال حرارت و عدد نوسلت محلي از رابطه زير محاسبه مي شوند:

$$h_x = -k \cdot \frac{dT}{dy} \cdot \frac{1}{(T_w - T_\infty)} \qquad (٦)$$

$$Nu_x = -\frac{dT}{dy} \cdot \frac{x}{(T_w - T_\infty)} \qquad (٧)$$

تمام خواص ترموفيزيكي هوا در دماي فيلم اندازه گيري شده است:

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} \qquad (٨)$$

از آن جائي كه بررسي تجربي هميشه با خطا همراه است، بايد تلاش نمود تا مقادير خطاهاي وارد شده در آزمايش را به حداقل رساند. اما اين تلاش معمولاً بوسيله دقت اندازه گيري وسايل و تجهيزات آزمايشگاهي محدود مي شود. براي اينكه ميزان خطاي وارد شده به نتايج تجربي را بدست آوريم لازم است تا ميزان دقت و حساسيت دستگاههاي اندازه گيري را بدانيم. در مطالعه تجربي حاضر محاسبه تحليل خطا يا عدم قطعيت در آزمايش براي تمامي موارد آزمايش انجام شده است كه روش تحليل آن بر اساس روش ارائه شده توسط كلين و مک كلينتوک [١٧] مي باشد. در اين روش، فرض مي شود كه نتيجه يک آزمايش تجربي مانند Ψ وابسته به M متغيير مستقل مانند $\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_M$ باشد. در اين صورت

ميـزان خطاي وارد شده در نتيجه حاصله، Ψ ، بـه صـورت زير محاسبه مي شود:

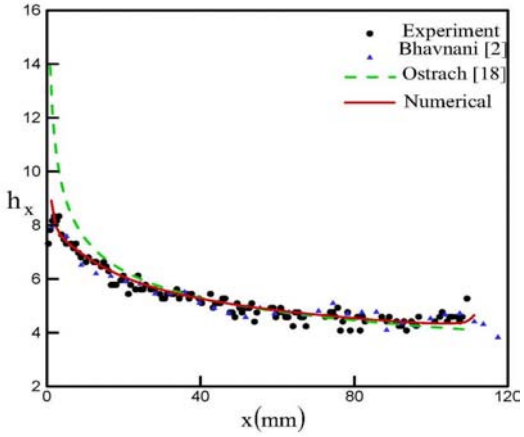
$$\delta\Psi = \sqrt{\sum_{i=1}^{M}\left(\frac{\partial\Psi}{\partial\varphi_i}\delta\varphi_i\right)^2} \qquad (٩)$$

كـــه در آن $\delta\varphi_1, \delta\varphi_2, \cdots, \delta\varphi_M$ عـــدم قطعيـــت در متغيرهـاي مسـتقل مـي باشـد. مقـدار عـدم قطعيـت در متغيرهاي مسـتقل توسـط دقـت انـدازه گيـري وسـايل و تجهيزات آزمايشگاهي تعيين مـي شـود. بـه عنـوان مثـال خطاي مربوط به دقت ترموكوپلها در انـدازه گيـري دمـاي محيط يا خطاي مربوط به دقت فشارسنج در اندازه گيـري فشار محيط از جملـه متغيرهـاي مسـتقل در رابطـه فـوق هستند. همچنين عدم قطعيت در محاسبه ضريب هـدايت حرارتي لوله بيضي شكل و عدم قطعيت در محاسبه طـول لوله از موارد ديگر منابع خطا در آزمايش مـي باشـند. امـا مهم ترين منبع خطا در آزمايش تداخل سنج نوري مـاك-زندر مربوط است به دقت در اندازه گيـري فاصـله خطـوط ايزوترم تا سطح لوله بيضي شـكل. بـا انجـام تحليـل عـدم قطعيت در عدد نوسلت متوسط براي لوله بيضـي در تمـام موارد آزمايش، مقدار آن بـه طـور متوسـط از $\pm$ ٢/٤% ٥/٦ تجاوز نمـي كنـد. از آن جـائي كـه ارائـه جزئيـات مربـوط تحليل عدم قطعيت در آزمايش و نحوه اسـتخراج داده هـا هدف اصلي اين مقاله نيست بـراي ديـدن جزئيـات آن بـه مرجع [١٦] مراجعه شود.

ارائه نتايج و بحث و بررسي

به منظور بررسي صحت انجام آزمايش ها و معتبرسـازي كد عددي، انتقال حرارت جابجايي آزاد بر روي يك صفحه تخت عمودي در دماي ثابت انجام شـده اسـت. شـكل (٤) تغييرات ضريب انتقال حرارت موضعي را بر حسـب فاصـله از لبه پايييني صفحه نشان مي‌دهد. به منظور مقايسه نتايج تجربي بهواني و برگلز [٢] و نتايج تحلـيلي اوسـتراچ [١٨] نيز در اين نمودار رسم شده است. اختلاف دماي سـطح بـا محيط در كـار حاضـر و كـار تجربـي بهـواني و برگلـز بـه ترتيـب $30.1^{\circ}C$ و $29.8^{\circ}C$ اسـت. اخـتلاف در متوسـط ضريب انتقال حرارت بدسـت آمـده در كـار حاضـر و كـار بهواني و برگلز [٢] و اوستراچ به ترتيـب ١/٤٢% و ٤/٢٤% براي كار تجربي و ٠/٧٨% و ٤/٨٤% براي كار عددي اسـت. علت اينكه اختلاف در متوسط ضريب انتقال حرارت با كار تحليلي اوستراچ بيشتر از كار تجربي بهواني و برگلز اسـت به اين دليل مي‌باشد كه اوستراچ رابطـه اي تحليلـي ارائـه كرده كه در آن ضريب معادله تـابعي از عـدد پرانـدل و در نتيجه تابعي از ويسكوزيته سـينماتيكي، ν اسـت. اوسـتراچ مقدار ويسكوزيته سينماتيكي را در دمـاي محـيط بدسـت آورده در صورتي كه در اين مقاله تمام خواص ترموفيزيكي سيال در دماي فيلم بدست آمده است. همچنـين لازم بـه ذكر است كه نتايج براي نقـاط نزديـك بـه لبـه ورودي بـا نتايج تحليلي اوستراچ بخوبي مطابقت ندارد. ايـن اخـتلاف بدليل اين است كه در مطالعه تحليلي فرض شده كه طول در راستاي صفحه نسبت به ضخامت لايه مرزي بـه انـدازه كافي بزرگ باشد. واضح است كه اين فـرض نزديكـي لبـه ورودي صـادق نيسـت. عـدم قطعيـت در كـار تجربـي و اغتشاشات خارجي مي تواننـد عوامـل ديگـري باشـند كـه منجر به ايجاد اختلاف بين كار تجربي حاضر و كار تحليلي اوستراچ شده است.

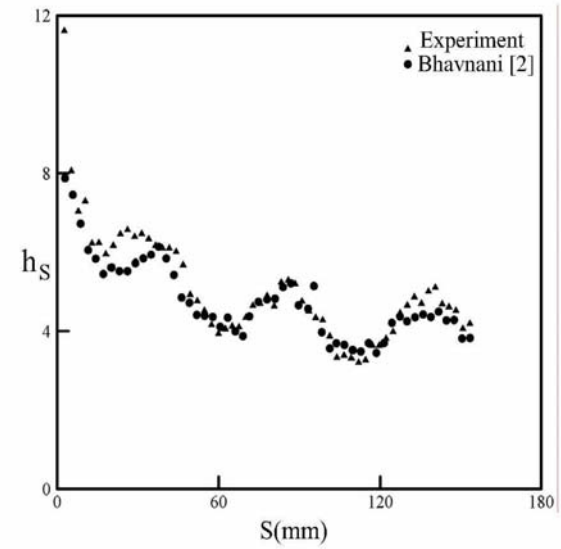
همچنين به منظور اطمينان بيشتر از صحت انجام آزمايش و روش استخراج داده‌ها، مقايسه اي با كار تجربي بهواني و برگلز [٢] بر روي صفحه سينوسي با نسبت دامنه به طـول موج $\alpha = 0.05$ انجام شده است. شكل (٥) ضريب انتقـال حرارت محلي را برروي صفحه نشان مي دهد. اخـتلاف در متوسط انتقال حرارت بـا كـار بهـواني بـراي صـفحه برابـر ٤/٨ % است. در اين نمودار محور x طول منحنـي صـفحه سينوسي شكل از نقطه پايين صفحه مـي باشـد. همـانطور كه مشاهده مي شود تطابق خوبي بين كار تجربـي حاضـر با كار تجربي بهواني و برگلز بدست آمده است.



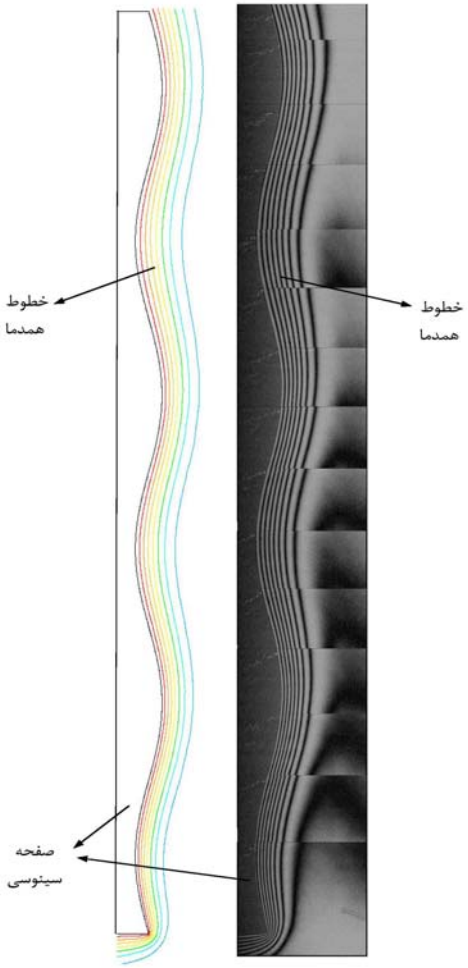
شكل٤ ضريب انتقال حرارت محلي براي صفحه همدماي تخت عمودي.

در شكل (٦) تصوير خطوط همدماي تشكيل شده بـر روي صفحه سينوسي شكل در فضـاي نامحـدود و عـدد رايلـي $Ra_l = 513110$ نشان داده شده است. تصوير سمت راست

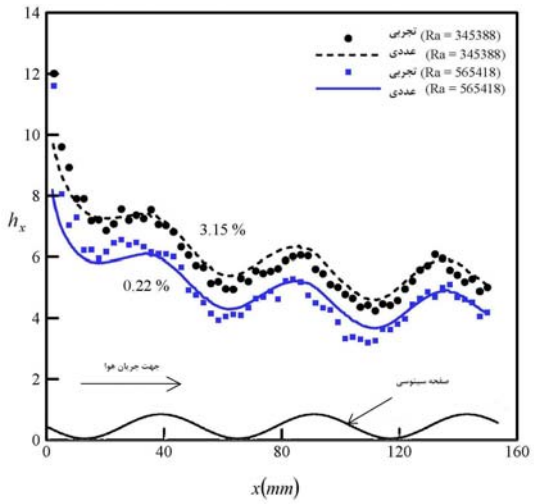
عكس حاصل از تداخل سنجي بوده و تصوير سمت چپ نتيجه كار عددي مي باشد.



شكل ٥ ضريب انتقال حرارت محلي براي صفحه سينوسي برحسب طول منحني.



شكل ۶ تصاوير ايزوترمهاي تشكيل شده روي سطح سينوسي شكل، تصوير سمت راست عكس تداخل سنجي و تصوير سمت چپ نتيجه كار عددي است.

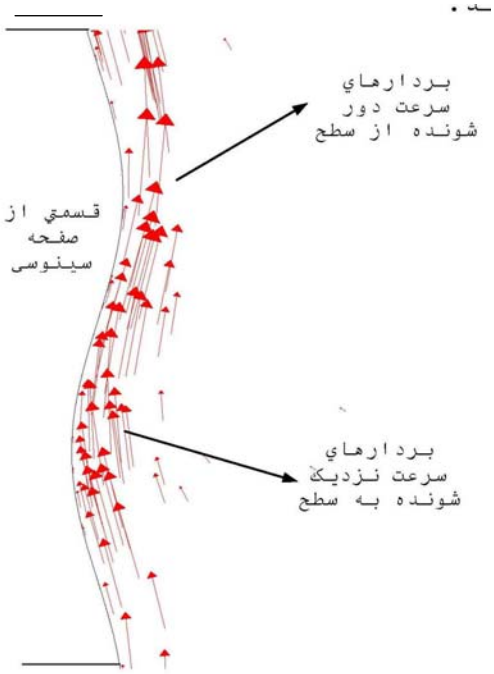


شكل ٧ مقايسه بين ضريب انتقال حرارت محلي بدست آمده از كار عددی و تجربي براي صفحه سينوسي.

شكل (٧) نيز مقايسه اي بين مقادير عددي و تجربي ضريب انتقال حرارت محلي رابراي صفحه سينوسي شكل در اعداد رايلي مختلف نشان مي دهد. لازم به ذكر است كه به منظور وضوح تصوير نتايج تنها براى دو عدد رايلي مختلف آورده شده است. روند تغييرات ضريب انتقال حرارت محلي بدست آمده از كار عددى بخوبي با نتايج تجربي مطابقت دارد. قدر مطلق درصد اختلاف بين ضريب انتقال حرارت متوسط بدست آمده از كار عددي و تجربي در كنار منحني مربوطه در نمودار قابل مشاهده است.

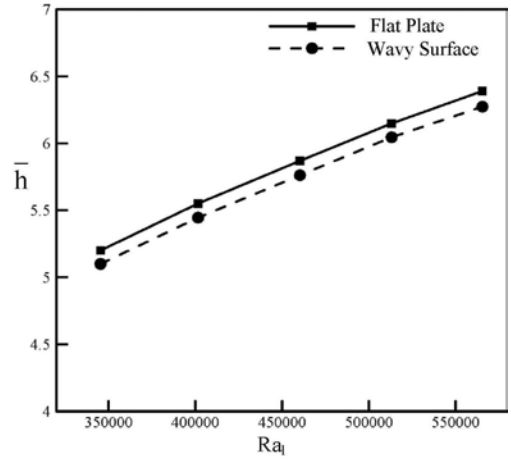
با توجه به مقايسه هاي انجام شده در بالا مي توان به صحت انجام كار تجربي و اعتبار كد عددي فلوئنت اطمينان حاصل كرده و نتايج را براي ساير موارد ارائه كرد. همانطوركه از شكل (٧) مشاهده مي شود رفتار پريوديك ضريب انتقال حرارت بخوبي مشخص است. دوره تناوب تغييرات ضريب انتقال حرارت با فركانس صفحه سينوسي شكل برابر مي باشد (منحني صفحه سينوسي در پايين شكل (٧) آورده شده است). مكان مينيمم و ماگزيمم ضريب انتقال حرارت نسبت به قله‌ها و فرورفتگيهاي صفحه سينوسي كمي به سمت بالا دست جريان جابجا شده‌اند. مقدار و تغييرات ضريب انتقال حرارت موضعي به شيب صفحه سينوسي شكل بستگي دارد و با تغيير شيب صفحه تغيير مي‌كند. براي آن قسمتي از صفحه كه جهت گيري آن به سمت پايين است جريان هوا به صفحه نزديك شده و در نتيجه نرخ انتقال حرارت بالاست. براي آن قسمتي از صفحه كه جهت گيري آن به سمت بالاست،

جريان هـوا از صـفحه دور شـده و در نتيجـه نـرخ انتقـال حرارت پايين است. اين موضوع در شكل (٨) بخوبي نشان داده شده است. در اين شكل قسمتي از صـفحه سينوسـي شكل به همراه بردارهاي سرعت اطراف صفحه بزرگنمـايي شده است. همانطور كه از اين شكل پيداست جهـت فلـش سرعت در آن قسمتي از صفحه كـه جهـت گيـري آن بـه سمت پايين است به سـمت سـطح صـفحه بـوده و نشـان دهنده آنست كه جريان هوا به سطح نزديک مي شود و در نتيجه نرخ انتقال حرارت افزايش مي يابد. براي آن قسمتي از صفحه كه جهت گيري آن به سمت بالاست رونـد فـوق معكوس است. بنـابراين همـين جريـان *نزديک شـونده* و *دورشونده* از سـطح عامـل اصـلي تنـاوبي شـدن تغييـرات ضريب انتقال حرارت محلي است. كـاهش ضـريب انتقـال حرارت موضعي از يك قله بر روي صفحه آغـاز شـده و تـا فرورفتگـي بـر روي صـفحه ادامـه مـي‌يابـد. سـپس رونـد افزايشي ضريب انتقال حرارت موضعي شروع شده و تا قلـه بعدي بر روي صفحه ادامه مي‌يابد. روند كـاهش و افـزايش ضريب انتقال حـرارت بـراي سـيكل بعـدي دوبـاره تكـرار مي‌شود. هر چه به پايين دست جريان حركـت مـي كنـيم دامنه ضريب انتقال حرارت موضعي كاهش مي يابـد. ايـن بدليل افزايش ضخامت لايه مرزي حرارتي مـي باشـد كـه همانند يك عامل دمپينگ عمل مي كند.

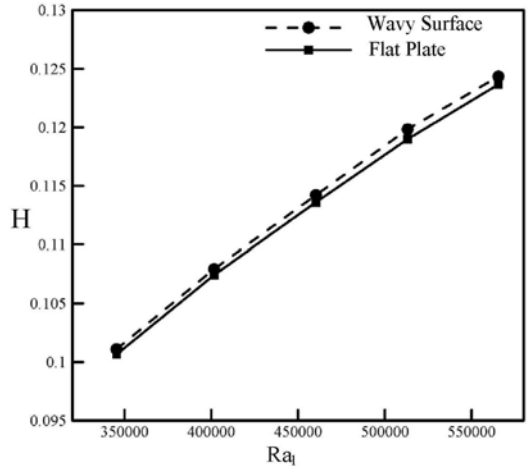


شكل ٨ :تصوير بزرگنمايي شده قسمتي از صفحه سينوسي شكل به همراه بردارهاي سرعت اطراف آن.

شكل (٩) مقايسه اي بين ضريب انتقـال حـرارت متوسـط براي صفحه تخت و سينوسي شكل در فضاي نامحـدود در اعداد رايلي مختلف ارائه مي دهد. همانطور كه از اين شكل مشخص است مقدار ضريب انتقال حـرارت متوسـط بـراي صفحه تخت از صفحه سينوسي شـكل بيشـتر اسـت. ايـن بدان معناسـت كـه سينوسـي كـردن صـفحه نـرخ انتقـال حرارت متوسط را نسبت به صفحه تخت بـا سـطح تصـوير شده يكسان كاهش مـي دهـد. امـا آنچـه كـه در طراحـي صفحات انتقال حرارت مهم است مقدار كل حرارت منتقل شده از صفحه مي باشد.



شكل ٩: ضريب انتقال حرارت متوسط برحسب عدد رايلي.

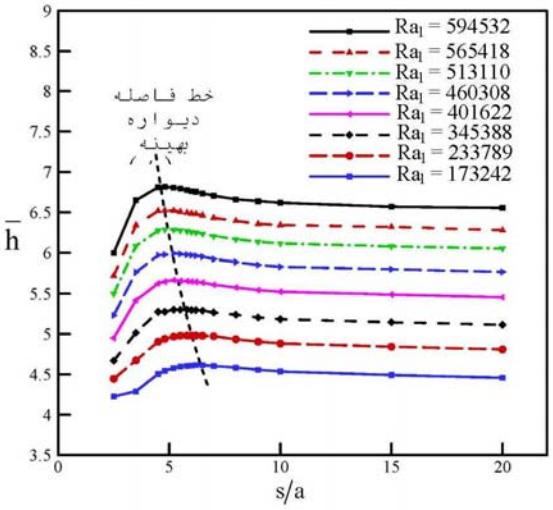


شكل ١٠ : ميزان انتقال حرارت كلي $H = \bar{h} \cdot A$ برحسب عدد رايلي (A سطح كل تبادل انتقال حرارت است).

شكل (١٠) مقدار كل انتقال حرارت جابجـايي از صـفحات در فضاي نامحدود را نشان مي‌دهد. همـانطور كـه در ايـن نمـودار قابـل مشـاهده اسـت مقـدار كـل انتقـال حـرارت جابجايي از صفحه سينوسي شكل نسبت به صـفحه تخـت افزايش مي‌يابد. اين بدليل افـزايش سـطح تبـادل حـرارت

مي‌باشد. اگر مقايسه‌اي با صفحه تخت با سطح تصوير شده يكسان داشته باشيم، مقدار افزايش سطح تبادل حرارت براي صفحات سينوسي شكل با نسبت دامنه به طول موج α= ٠/٠٥ برابر ٢/٣٨ % خواهد بود. بنابر اين افزايش مقدار انتقال حرارت جابجايي كل از صفحه به قيمت مصرف مواد بيشتر براي ساخت صفحات با نسبت دامنه به طول موج بزرگتر تمام خواهد شد.

شكل (١١) مقادير عددي ضريب انتقال حرارت متوسط بر روي صفحه سينوسي درون كانال را برحسب فاصله دو ديواره، s/a، براي اعداد مختلف رايلي نشان مي دهد. مي توان مشاهده كرد كه در يک فاصله ديواه ثابت با افزايش عدد رايلي، ضريب انتقال حرارت متوسط بر روي صفحه سينوسي شكل افزايش مي يابد. در هر عدد رايلي ثابت يک فاصله ديواره بهينه اي، $(s/a)_{opt}$، وجود دارد كه نرخ انتقال حرارت از روي صفحه سينوسي شكل بيشينه خواهد شد. در فاصله بهينه ديواره، جريان هوا بهتر از درون كانال عبور كرده و در نتيجه ضريب انتقال حرارت افزايش مي يابد. چنين نتايجي براي كانال با ديواره هاي تخت عمودي توسط كوهن و روزنا [١٩] بدست آمده است. در يک رايلي ثابت با افزايش فاصله ديواره ها به مقدار بيشينه $s/a = ٢٠$، ضريب انتقال حرارت كاهش يافته تا اينكه به مقدار آن براي صفحه سينوسي شكل در فضاي نامحدود نزديک مي شود. مقدار اختلاف در ضريب انتقال حرارت متوسط در فاصله ديواره $s/a = ٢٠$ و فضاي نامحدود براي اعدادرايلي مختلف بطور متوسط برابر % ٠/٣ است.



شكل ١١ : ضريب انتقال حرارت متوسط براي صفحه سينوسي درون كانال.

همچنين شكل (١١) نشان مي دهد كه با كاهش فاصله ديواره از مقدار بهينه آن، ضريب انتقال حرارت متوسط بطور شديد كاهش پيدا مي كند. علت اين كاهش شديد اينست كه در فواصل ديواره كمتر از $(s/a)_{opt}$ مسير عبور جريان مسدود شده و دبي هواي عبوري از درون كانال به شدت كاهش مي يابد. همچنين در اين شرايط اثرات اتلاف برروي ديواره هاي كانال افزايش مي يابد. در فواصل ديواره كمتر از $(s/a)_{opt}$ لايه مرزي تشكيل شده برروي صفحه سينوسي شكل با ديواره آديباتيک مقابل آن بشدت تداخل كرده و در نتيجه نرخ انتقال حرارت كاهش پيدا مي كند. نكته قابل توجه در نمودار (١١) آنست كه مقدار $(s/a)_{opt}$ براي اعداد رايلي مختلف، يكسان نيست. با افزايش عدد رايلي مقدار فاصله بهينه دو ديواره كاهش پيدا مي كند. اين اثر در شكل (١١) بصورت خط چين نشان داده شده است. علت اين پديده اينست كه با افزايش عدد رايلي صفحه ضخامت لايه مرزي تشكيل شده روي صفحه سينوسي نازكتر شده و در نتيجه براي اينكه ديواره مقابل بتواند تأثير بهتري بر روي نرخ انتقال حرارت داشته باشد، فاصله آن تا صفحه سينوسي شكل بايد كاهش يابد.

نتيجه‌گيري

نتايج حاصل از اين مطالعه عبارتند از:

١- فركانس تغييرات ضريب انتقال حرارت محلي بر روي صفحه سينوسي شكل برابر فركانس ساخت خود صفحه مي باشد.

٢- با موجدار كردن يک صفحه تخت عمودي ضريب انتقال حرارت متوسط از آن كاهش مي يابد. اما نرخ كل حرارت دفع شده از آن افزايش مي يابد.

٣- آنچه كه باعث نوساني شدن ضريب انتقال حرارت بر روي يک صفحه سينوسي شكل مي شود، مكانيزم جريان *نزديک شونده* و *دورشونده* از سطح است.

٤- در مورد صفحه سينوسي شكل درون يک كانال همواره يک فاصله بهينه بين دو ديواره وجود دارد كه نرخ انتقال حرارت جابجايي آزاد از روي صفحه بيشينه مي شود. اين فاصله بهينه تابعي از عدد رايلي صفحه سينوسي شكل است.

فهرست علائم

a : دامنه صفحه سينوسي شكل(m)

c : ظرفيت گرماي ويژه(J/kg.K)
g : شتاب گرانش(m/s^2)
Gr : عدد گراشف
h : ضريب انتقال حرارت($W/m^2.K$)
H : كلي ضريب انتقال حرارت(W/ K)
k : ضريب هدايت حرارتي(W/m.K)
l : طول موج صفحه سينوسي شكل(m)
Nu : عدد نوسلت، Gr.Pr
P : فشار (Pa)
Pr : عدد پرانتل
S : فاصله بين دو ديواره (m)
S : طول منحني برروي صفحه سينوسي شكل(m)

T : دما(K)
u, v : مولفه سرعت در راستاي x ,y (m/s)
x, y: محورهاي مختصات(m)
α : نسبت دامنه به طول موج صفحه،a/l
β : ضريب انبساط حرارتي(1/K)
φ : متغير مستقل در رابطه (٩)
λ : طول موج نور ليزر(m)
μ : ويسكوزيته(kg/m.s)
ρ : چگالي(kg/m^3)
σ : تابع هندسه سينوسي سطح
Ψ : متغير وابسته در رابطه (٩)

مراجع

1 - Yao, L. S. (1982). "Natural convection along a vertical wavy surface." *ASME J. Heat Transfer,* Vol. 105, PP. 465-469.

2 - Bhavnani, S. H. and Bergles, A. E. (1988). "An experimental study of laminar natural convection heat transfer from wavy surfaces." *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 96, PP. 173-180.

3 - Moulic, S. G. and Yao, L. S. (1989). "Mixed convection along a wavy surface." *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 111, PP. 974-979.

4 - Rees, D. A. S. and Pop, I. (1994). "A note on free convection along a vertical wavy surface in a porous medium." *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 116, PP. 505-508.

5 - Rees, D. A. S. and Pop, I. (1995). "Free convection induced by a vertical wavy surface with uniform heat flux in a porous medium." *ASME J. Heat Transfer,* Vol. 117, PP. 547-550.

6 - Cheng, C. Y. (2000). "Natural convection heat and mass transfer near a vertical wavy surface with constant wall temperature and concentration in a porous medium." *Intl. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, PP. 1143-1154.

7 - Wang, C. C. and Chen, C. K. (2001). "Transient force and free convection along a vertical wavy surface in micropolar fluids." *Intl. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 44, PP. 3241-3251.

8 - Adjlout, L., Imine, O., Azzi, A. and Belkadi, M. (2002). "Laminar natural convection in an inclined cavity with a wavy wall." *Intl. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, PP. 2141-2152.

9 - Mahmud, S., Das, P. K., Hyder, N. and Sadrul Islam, A. K. M. (2002). "Free convection in an Enclosure with vertical wavy walls." *Intl. J. Thermal Sciences*, Vol. 41, PP. 440-446.

10 - Jang, J. H., Yan, W. M. and Liu, H. C. (2003). "Natural convection heat and mass transfer along a vertical wavy surface." *Intl. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, PP. 1075-1083.

11 - Kumar, Shalini, B. V. R. (2004). "Non-darcy free convection induced by a vertical wavy surface in a thermally stratified porous medium." *Intl. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, PP. 2353-2363.

12 - Jang, J. H. and Yan, W. M. (2004). "Mixed convection heat and mass transfer along a vertical wavy surface." *Intl. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, PP. 419-428.

13 - Yao, L. S. (2005). "Natural convection along a vertical complex wavy surface." *Intl. J. Heat Mass Transfer,* Vol. 49, PP. 281-286.

14 - Fluent user's guide, *Fluent Inc*, 2003.

15 - Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill.

16 - Ashjaee, M., Yousefi, T. and Amiri, M. "Free convection heat transfer from a confined horizontal elliptic cylinder." Accepted for publication in the *Heat Transfer Engineering*, Vol. 27, PP. 116-124.

17 - Kline, S. J. and McClintock, F. A. (1953). "Describing experimental uncertainties in single sample experiments." *Mech. Eng.* Vol. 75, PP. 3-8.

18 - Ostrach, S. (1952). "An analysis of laminar free-convection flow and heat transfer about a flat plate parallel to direction of the generating body force." *NACA Technical Note 2635*.

19 - Cohen, A. B. and Rohsenow, W. M. (1984). "Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates." *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 106, PP. 116-123.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Total Heat Transfer

2 - Mach-Zehnder Interferometer