

جابه‌جایی مختلط و تشعشع سطحی در کانال شیبدار با منابع

گرمایی برجسته

محمد رضا شیرزادی^۱، علی بهبهانی نیا^{۲*}، مجید قاسمی^۳

۱- کارشناس ارشد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

*تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵

alibebhaninia@kntu.ac.ir

(دریافت مقاله: آذر ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: مهر ۱۳۸۷)

چکیده- در این مقاله حل عددی جابه‌جایی مختلط با هدایت حرارتی و تشعشع سطحی در کانال شیبدار تشکیل شده از یک برد مدار چاپی همراه با سه تراشه به‌عنوان مولد گرما بررسی شده است. جریان هوا بعنوان سیال خنک کننده به‌صورت حالت دائم، لایه‌ای، تراکم ناپذیر و در حال توسعه حرارتی و هیدرودینامیکی فرض شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود در شبکه جابه‌جا گسسته سازی شده و برای تزویج سرعت و فشار روش سیمپل به‌کار رفته است. مقایسه نتایج عددی با کارهای تجربی و عددی موجود صحت و دقت نتایج را تأیید می‌کند. نتایج عددی برای توزیع دما و سرعت و بیشینه دمای تولید شده در تراشه به‌ازای زاویه نصب $0 < \phi < 90$ و سرعتهای مختلف فن، بر پایه عدد رینولدز در محدوده $150 < Re_D < 1400$ و شار حرارت تولیدی در تراشه‌ها بر پایه عدد گراشوف در محدوده $1 \times 10^6 - 7 \times 10^4$ ارائه شده است. بیشترین تأکید بر مقایسه دو حالت مختلف طراحی برد به‌صورت افقی $\phi = 0$ و عمودی $\phi = 90$ به‌ازای پارامترهای مختلف است. نتایج نشان می‌دهند که دمای بیشینه، به‌عنوان مهمترین پارامتر طراحی تجهیزات الکترونیکی، در محدوده جابه‌جایی طبیعی با افزایش زاویه نصب برد از حالت افقی به حالت عمودی، تا ۱۲ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد اما در محدوده جابه‌جایی اجباری، تا ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: جابه‌جایی مختلط، ترکیب هدایت و جابه‌جایی و تشعشع، حل عددی، کانال شیبدار

Conjugate Mixed convection with Surface Radiation in an Inclined Channel with Protruding Heat Sources

M. R. Shirzadi¹, A. Behbahani-nia^{2*}, M. Ghasemi³

1- Master of Science, MAPNA Turbine Engineering and Manufacturing Co. (TUGA)

2- Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, K N Toosi University of Technology

3- Associate Professor, Mechanical Engineering Department, K N Toosi University of Technology

*P O Box: 19395-1999 Tehran

alibebhaninia@kntu.ac.ir

Abstract

Numerical solution for mixed convection combined with surface radiation in an inclined channel containing three protruding heat sources is investigated in this article. This combination presents printed circuit boards in electrical equipments. Air is assumed to be the working fluid which is laminar, steady, incompressible and thermally and hydrodynamically developing. Governing equations are discretized using the F.V. method in a staggered domain and a simple algorithm is used to couple velocity and a pressure. Numerical results presented for temperature and velocity contribution and maximum temperature that occur in chips for different values of fan velocity as Reynolds number $150 < Re < 1400$ and heat generated in chips as Grashof number $1 < Gr < 1.2 \times 10^7$ and channel installation angle $0 < \phi < 90$. Main emphasis in this article is comparison between vertical and horizontal design of electrical equipments. According to results in natural convection regime maximum temperature decreases as channel angle increases from 0 to 90 but in forced convection regime, maximum temperature increases 30 centigrade.

Keywords: Conjugate Convection, Conduction, Radiation, Numerical Solution, Incline

۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون فناوری ساخت، تجهیزات الکترونیکی کوچکتر و یا بازدهی بیشتر و دارای شار حرارتی بیشتری شده‌اند. یکی از موارد مهم در طراحی و نگهداری تجهیزات گرم‌ساز الکترونیکی، بهبود روش‌های سرمایه‌گذاری برای کارکرد در دمای مطمئن و ایمن است. هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده به‌دلیل مسائل اقتصادی و ایمنی، در بیشتر موارد استفاده می‌شود. نتایج عددی برای کانال شیبدار و دارای منابع گرمایی هم‌دمای توسط یوسل [۱] ارائه شده است. چائو و ارتگا [۲] نیز به بررسی جابه‌جایی مختلط در کانال شیبدار با منابع گرمایی با شار یکنواخت پرداخته‌اند. کیم و آناناند [۳] به بررسی جابه‌جایی اجباری برای منابع گرمایی برجسته پرداخته‌اند و با به‌کار بردن شرط مرزی تکرار شونده در عرض کانال، نتایج را برای یک دسته برد الکتریکی ارائه کرده‌اند. بالاجی [۴] به بررسی جابه‌جایی طبیعی در شکاف با در نظر گرفتن تشعشع سطحی و هدایت در دو دیواره عمودی و یک دیواره هم‌دمای به‌ازای اعداد مختلف رایلی پرداخته است. فوروکاوا [۵] به بررسی جابه‌جایی اجباری در یک دسته برد افقی که دارای منابع حرارتی برجسته باشند پرداخته اما فقط هدایت و جابه‌جایی را در نظر گرفته است. نتایج تجربی در کانال افقی که دارای دو ردیف منبع گرمایی به‌صورت 8×4 در دیواره پایینی و بالایی نصب شده، توسط دوقان [۶] ارائه شده است. او نسبت‌های طول به عرض برابر ۲، ۴ و ۱۰ را به‌ازای اعداد مختلف رینولدز و گراش‌مختلف بررسی کرده است. بالاجی [۷] با در نظر گرفتن تشعشع سطحی و هدایت در فاز جامد، به بررسی جابه‌جایی مختلط در کانال افقی با ۴ منبع گرمایی برجسته پرداخته و با ثابت فرض

کردن هندسه کانال به بررسی اثر ضریب هدایت و ضریب صدور برد و منابع حرارتی پرداخته است. رائو [۸] به بررسی جابه‌جایی مختلط بدون در نظر گرفتن تشعشع در یک دسته برد که به‌صورت عمودی قرار دارند، پرداخته است. بر طبق نتایج حاصل، ۴۱ تا ۴۷ درصد از گرمای تولید شده در تراشه‌ها توسط هدایت حرارتی در برد منتقل می‌شود. مارتینز [۹] بصورت تجربی به بررسی جابه‌جایی مختلط برای اعداد رینولدز ۳۰۰ تا ۷۰۰ در کانال عمودی - که بصورت نامتقارن گرم می‌شود و جهت نیروی شناوری مخالف جریان اصلی است - پرداخته است و نشان داده است که نیروی شناوری در اطراف دیواره‌های داغ، باعث نامتعادل کردن جریان و به‌وجود آمدن گردابه‌هایی در آن می‌شود. شریف [۱۰] به بررسی اثر شیب حفره بر جابه‌جایی مختلط در حفره‌ای دو بعدی که دارای یک دیواره‌ای متحرک است، بدون در نظر گرفتن تشعشع پرداخته و نشان می‌دهد که با افزایش زاویه حفره، مقدار متوسط عدد نوسلت افزایش می‌یابد.

با بررسی کارهای انجام شده مشاهده می‌شود که فقط در دو مورد از تحقیقات، تشعشع سطحی در نظر گرفته شده است. همچنین تحقیقی در مورد بررسی اثر شیب کانال و تشعشع سطحی در بردی با منابع حرارتی برجسته و با در نظر گرفتن همزمان هدایت، جابه‌جایی و تشعشع انجام نشده است. همچنین با آن که تحقیقات و متنوعی در زمینه جابه‌جایی مختلط در کانال عمودی و افقی به‌طور جداگانه انجام شده، اما تا کنون مقایسه جامعی بین طراحی تجهیزات گرم‌ساز به‌صورت افقی یا عمودی انجام نشده است. در این مقاله به این موضوع به‌عنوان یکی از اهداف اصلی پرداخته شده است.

ضریب هدایت حرارتی برد $L_c = 20\text{mm}$ ، ضریب هدایت حرارت تراشه $k_s = 0.25$ و ضریب هدایت حرارت تراشه $k_h = 1.04$ و ضریب صدور تراشه‌ها $\varepsilon_h = 0.55$ و ضریب صدور برد $\varepsilon_s = 0.55$ بعنوان ابعاد پایه فرض شده است. با فرض وجود یک فن در راستای کانال، هوا با سرعت u_{in} و دمای T_{in} به کانال وارد می‌شود. محدوده مقادیر مورد استفاده در حل عددی در جدول ۱ نشان داده شده است. برای بی‌بعد کردن معادلات، پارامترهای بدون بعد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X = \frac{x}{D}, Y = \frac{y}{D}, U = \frac{u}{u_{in}}, V = \frac{v}{u_{in}}, \theta = \frac{T - T_{in}}{\Delta T_{ref}}$$

$$P = \frac{p}{\rho u_{in}^2}, \Delta T_{ref} = q_v L_h D_h / k_{air}$$

با صرف نظر از اتلاف لزجت و اثر تراکم پذیری هوا، معادلات حاکم بی بعد برای دو فاز سیال و جامد به صورت زیر است:

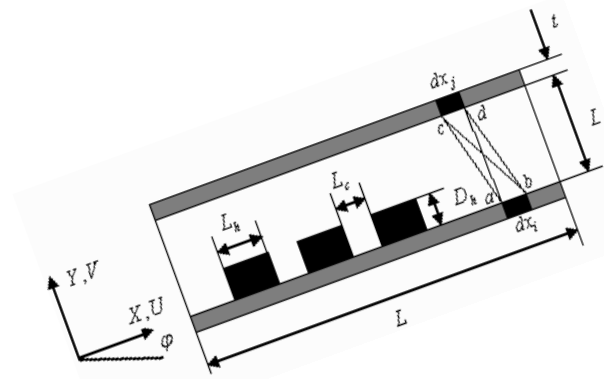
$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

(۲)

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}_D} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{Gr^*}{\text{Re}_D} \theta \sin \varphi \quad (3)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}_D} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{Gr^*}{\text{Re}_D} \theta \cos \varphi \quad (4)$$

$$\text{Re Pr}_{air} \left(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \frac{k}{k_{air}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) + \frac{D^2}{L_h D_h} \delta$$



شکل ۱ هندسه برد الکترونیکی و سه تراشه متصل به آن

۲- توصیف مسأله

طرحواره از مسأله مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده که شامل برد الکترونیکی با سه تراشه مولد گرما است. برد می‌تواند به صورت افقی، عمودی یا با زاویه نصب φ نسبت به افق قرار گیرد. هدایت حرارتی در برد و تراشه‌ها و دیواره بالایی - که می‌تواند یک برد دیگر یا دیواره محفظه تجهیزات الکترونیکی باشد - در نظر گرفته شده است. سطح خارجی تمامی دیواره‌ها عایق است. با فرض خنک‌کاری به کمک هوا ($pr = 0.71$) و شفاف بودن آن در دمای کاری مورد بررسی، تشعشع سطحی بین سطوح داخلی و ورودی و خروجی کانال در نظر گرفته شده است. جریان سیال به صورت دوبعدی، آرام، تراکم‌ناپذیر و در حال توسعه حرارتی و هیدرودینامیکی است. تمامی خواص فیزیکی سیال بجز چگالی آن ثابت است که برای آن از فرض بوزینسک برای جمله نیروی شناوری استفاده شده است. برای ارائه نتایج، مقادیر طول برد $L = 250\text{mm}$ ، عرض کانال $D = 25\text{mm}$ ، فاصله اولین تراشه با ورودی $L_1 = 60\text{mm}$ ، طول تراشه $L_h = 15\text{mm}$ ، ارتفاع تراشه $D_h = 7/5\text{mm}$ ، فاصله بین تراشه‌ها

جدول ۱ محدوده پارامترهای مورد استفاده

$$\begin{aligned} 100 < Re_D < 1400 \\ 7 \times 10^4 < Gr^* < 1/2 \times 10^6 \\ 19 < k_g / k_{air} < 250 \\ 0 < k_s / k_{air} < 170 \\ 1/4 < \varepsilon_s < 1/9 \\ 1/4 < \varepsilon_g < 1/9 \\ 0 < \varphi < \pi/2 \end{aligned}$$

اگر فاصله دو گره جامد و سیال با هم برابر ∂e و فاصله گره جامد تا سطح میانی برابر ∂e^- و برای سیال برابر ∂e^+ باشد، ضریب هدایت حرارتی بر روی سطح تماس جامد و سیال بر طبق [۵] برابر است با:

$$k_{int} = \frac{k_{air} k_s}{k_{air} \frac{\partial e^-}{\partial e} + k_s \frac{\partial e^+}{\partial e}} \quad (8)$$

شرایط مرزی حاکم بر مسأله به صورت زیر است:

• ورودی $X=0$ و $0 \leq Y \leq 1$

$$U=1, V=0, \theta=0 \quad (9)$$

• خروجی $X=L/D$ و $0 \leq Y \leq 1$

$$\frac{\partial V}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad \text{if} \quad (10)$$

$$U > 0, \theta = 0 \quad \text{if} \quad U \leq 0$$

• دیواره‌ها $0 \leq X \leq L/D$ و $Y = 1 + \frac{t}{D}$ و $Y = -\frac{t}{D}$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad (11)$$

در خروجی کانال برای سرعت U ، شرط بقای جرم اعمال شده است. برای مدل سازی دقیقتر دمای سیال برگشتی و چرخش جریان در خروجی، شرط مرزی (۹) اعمال شده است. دیواره‌های خارجی به صورت عایق فرض

δ ، دلتای کرونیگر، در سیال و برد برابر صفر و در تراشه‌ها برابر یک است.

انتقال حرارت تشعشعی سطحی در داخل کانال از روش محفظه^۱ و به کمک فرمول‌بندی رادیوسیتی^۲ محاسبه شده است. برای این منظور دیواره‌های داخل کانال به صورت سطح دیفیوز و خاکستری و ورودی و خروجی کانال بصورت دیوار سیاه در دمای محیط و هوا از نظر تشعشعی شفاف^۳ فرض شده است. ضرایب شکل از روش نخهای متقاطع هاتل [۹] محاسبه شده است. در این روش تقریبی فاصله لبه‌های هر دو المان روی سطوح جامد در داخل کانال با یکدیگر محاسبه گردیده و سپس از رابطه زیر استفاده شده است.

$$F_{i,j} = \frac{L_{ad} + L_{bc} - L_{ac} - L_{bd}}{2dx_i} \quad (5)$$

شار گرمای تشعشعی خروجی برای هر المان i به صورت زیر محاسبه می شود.

$$j_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^n F_{ij} j_j \quad (6)$$

با محاسبه شار گرمای خروجی از هر المان می توان شار گرمایی خالص تشعشعی از آن را محاسبه و آن را به معادله انرژی اضافه کرد. شار گرمایی خالص تشعشعی از رابطه زیر برای هر المان i محاسبه می شود:

$$q_r = \frac{\sigma T_i^4 - J_i}{(1 - \varepsilon_i) / \varepsilon_i} \quad (7)$$

1. Enclosure
2. radiosity/irradiation
3. non participating medium

به منظور به دست آوردن نتایج مستقل از اندازه شبکه به ازای $Re = 300$ و زاویه نصب $\phi = 0$ و ابعاد مرجع، با تغییر دادن تعداد اندازه شبکه‌ها، تغییرات دمای بیشینه را بررسی می‌کنیم که نتایج آن در جدول (۲) آمده است. در زیرترین حالت شبکه دمای بیشینه با ریزترین حالت حدود ۳٪ اختلاف دارد. بنابراین در کل محاسبات اندازه شبکه برابر 340×56 در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ دمای بیشینه بی بعد به ازای $Gr^* = 7.87 \times 10^5$ ، $Re = 300$ ، $\phi = 0$ و ابعاد پایه

تعداد گره‌ها در جهت X	تعداد گره‌ها در جهت Y	دمای بیشینه θ_{max}
۲۰۰	۳۰	۰/۱۷۹۸
۲۸۰	۴۰	۰/۱۸۲۴
۳۴۰	۴۵	۰/۱۸۴۶۸
۳۴۰	۵۶	۰/۱۸۴۶۲
۳۴۰	۶۴	۰/۱۸۴۸۵

تأیید صحت نتایج عددی حاصل با مقایسه نتایج عددی و تجربی ارائه شده توسط کیم [۱۱] برای جابه‌جایی طبیعی در یک دسته کانال عمودی و بدون مانع انجام شده است. در شکل ۲ عدد متوسط نوسلت به دست آمده از کارهای تجربی و عددی مقایسه شده است. نتایج عددی دقت مناسبی در مقایسه با نتایج تجربی دارند و بیشترین اختلاف آن برابر ۸٪ است.

۴- بحث و ارائه نتایج

۴-۱- بررسی اثر عدد رینولدز

در شکل ۳ بازای ابعاد مرجع و چهار زاویه مختلف نصب و $Re = 150$ و $Gr^* = 1/055 \times 10^5$ ، منحنی‌های دما و خطوط جریان نشان داده شده است. در حالت $\phi = 0$

شده‌اند و شرط عدم لغزش سیال بر روی سطوح جامد اعمال شده است. از آنجا که معادلات فاز جامد و سیال به‌طور همزمان حل شده، نیازی به شرط مرزی حرارتی بین سطح تماس آنها وجود ندارد و معادلات بقا در این سطح مشترک خودبخود ارضا می‌شوند. چهار گوشه فاز جامد در ورودی و خروجی نیز عایق فرض شده است.

۳- حل عددی

معادلات جبری حاکم بر مسأله با روش حجم محدود و به کمک الگوریتم سیمپل برای متغیرهای U, V, P, θ و J^* حل شده است. برای گسسته سازی جمله جابه‌جایی/پخش از روش پاورلاو^۱ استفاده شده است. برای محاسبه هدایت حرارتی، جابه‌جایی و تشعشع از شبکه‌ای تک‌ناحیه‌ای غیریک‌ناخت و جابه‌جا^۲ در کل ناحیه حل استفاده شده است. برای حل معادله تشعشع (۶) دما از مرحله قبلی در جمله $\epsilon_i \sigma T_i^4$ قرار داده شده و این جمله به صورت جمله منبع در معادله قرار گرفته و معادله حل می‌شود.

در نزدیکی سطوح جامد تعداد گره‌ها به علت بیشتر بودن گرادیان سرعت و دما بیشتر است. برای همگرایی سریعتر ضرایب تخفیف برای U, V, P, θ, J^* به ترتیب برابر $0/6, 0/7, 0/6, 0/85, 0/6$ و $0/6$ انتخاب شده است. برای حل دستگاه معادلات به دست آمده برای هدایت و جابه‌جایی از روش ماتریس سه‌قطری^۳ و برای تشعشع از روش گوس سایدل استفاده شده است. معیار همگرایی برای متغیرهای مسأله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathfrak{R} = \frac{\sum_{i,j} (\phi_{i,j}^{k+1} - \phi_{i,j}^k)^2}{\sum_{i,j} (\phi_{i,j}^{k+1})^2} < 10^{-6} \quad (12)$$

1. Power law
2. Staggered
3. TDMA

زاویه مختلف نصب و $Re = 1400$ و $Gr^* = 7.05 \times 10^5$ ،
منحنی‌های دما و خطوط جریان نشان داده شده است. با

افزایش عدد رینولدز Re جمله $\frac{Gr^*}{Re^2}$ در معادلات

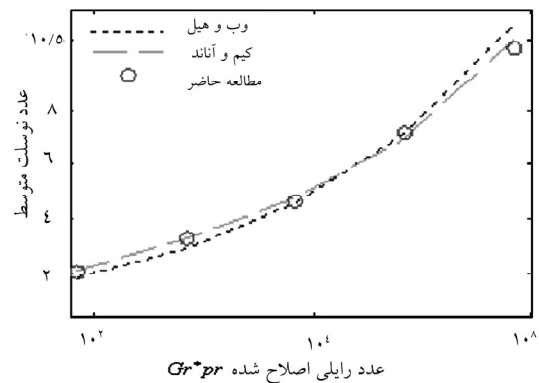
مومتم (۲) و (۳) به سرعت کاهش می‌یابد و در نتیجه سهم جابه‌جایی طبیعی بر رفتار سیال کمتر شده و سهم جابه‌جایی اجباری بیشتر می‌شود. در $Re = 1400$ به‌علت بیشتر بودن سرعت سیال، گردابه‌های بزرگتری نسبت به $Re = 150$ تشکیل می‌شود که این گردابه‌ها تا انتهای کانال ادامه داشته و باعث وارد شدن سیال سرد در خروجی کانال می‌شود. از آنجا که در یک کانال افقی این گردابه‌ها قویتر و دارای طول بیشتری نسبت به کانال عمودی است، سیال سرد بیشتری از سمت خروجی به کانال وارد شده و باعث کاهش بیشتر دما می‌شود. در شکل ۵a دمای بیشینه ایجاد شده در تراشه به‌ازای زوایای مختلف نصب و اعداد مختلف رینولدز ترسیم شده است. با ثابت نگاه داشتن خواص فیزیکی و هندسی، همواره با افزایش عدد رینولدز دمای بیشینه کاهش می‌یابد. در اعداد رینولدز کم - که جابه‌جایی طبیعی سهم بیشتری دارد - با افزایش زاویه نصب از حالت افقی $\phi = 0$ به حالت عمودی $\phi = 90$ دمای، بیشینه بی بعد در $Re = 150$ و $Re = 300$ به ترتیب ۲۱٪ و ۱۵٪ کاهش و در $Re = 700$ و $Re = 1000$ به ترتیب ۱۱٪ و ۴/۶٪ افزایش می‌یابد که ناشی از کاهش طول گردابه‌ها و کاهش میزان سیال ورودی در انتهای کانال است. در شکل ۶ دمای برد و دیواره کانال به‌ازای عدد رینولدز $Re = 150$ و $Re = 1000$ و زوایای مختلف ترسیم شده است. به‌علت تشعشع با محیط بیرون و تماس با هوای تازه، دمای سمت ورودی برد و دیواره کم است.

بزرگ بودن جمله $\frac{Gr^*}{Re^2} \theta \cos \phi$ در معادله (۳) و عمود بودن نیروی شناوری بر جریان، باعث بالا رفتن سیال

اطراف دیواره‌های گرم و ضخیم شدن لایه مرزی در انتهای کانال می‌شود. با افزایش زاویه نصب به $\phi = 30$ و

اضافه شدن جمله $\frac{Gr^*}{Re^2} \sin \phi$ به معادله (۲)، اندازه و

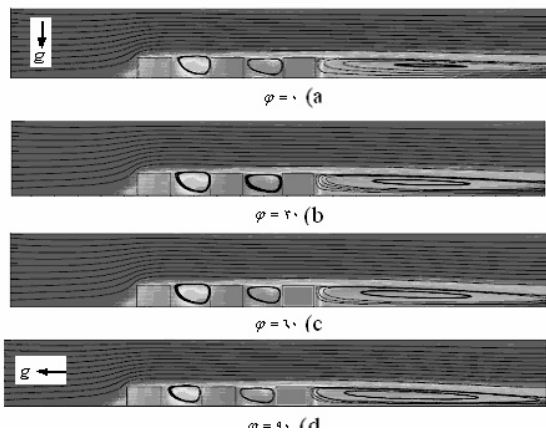
قدرت گردابه‌های بین تراشه‌ها و بعد از آخرین آنها کمتر می‌شود. در این حالت به‌علت بیشتر شدن سرعت سیال در کنار تراشه‌ها، دمای بیشینه در تراشه‌ها کمتر می‌شود. به‌ازای $\phi = 60$ نیز وضعیت به همین صورت است.



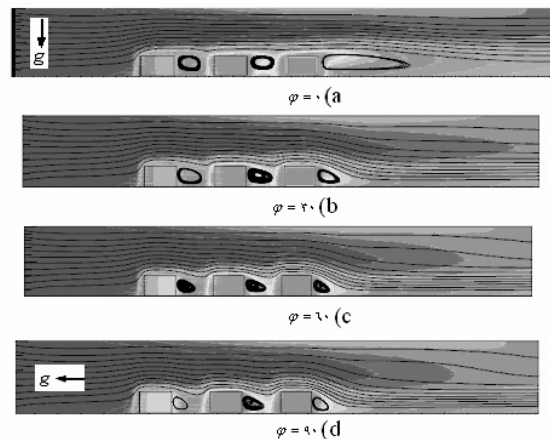
شکل ۲ مقایسه نتایج عددی با نتایج کیم [۳] برای جابه‌جایی طبیعی در کانال عمودی

در حالت طراحی کانال به‌صورت عمودی $\phi = 90$ ، اثر جابه‌جایی طبیعی و اجباری با یکدیگر جمع می‌شده و باعث افزایش سرعت سیال و کاهش دمای بیشینه به بیشترین حد خود می‌شود. با دقت در توزیع دما در شکل ۳ مشاهده می‌شود که دمای اولین تراشه به‌علت برخورد با هوای تازه و تشعشع بیشتر با محیط بیرون، کمتر از دو تراشه دیگر است. در شکل ۴ به‌ازای ابعاد مرجع و چهار

افقی ($\varphi = 0$)، پروفیل سرعت به شکل سهمی بوده و تغییر عدد گراشف اصلاح شده، اثری بر شکل آن ندارد. با افزایش زاویه نصب کانال و همجهت شدن نیروی شناوری و جابه‌جایی اجباری سرعت سیال در کنار برد حامل تراشه‌ها به‌علت دمای بالا، افزایش پیدا می‌کند. بیشترین سرعت سیال در حالت نصب کانال به‌صورت عمودی $\varphi = 90$ حاصل می‌شود زیرا جابه‌جایی طبیعی و جابه‌جایی اجباری کاملاً همجهت می‌شوند. در شکل ۵(b) دمای بیشینه بی بعد به‌ازای زوایای مختلف نصب اعداد مختلف گراشف در $Re = 300$ و ابعاد پایه ترسیم شده است. بر طبق تعریف دمای بی بعد با عدد گراشف نسبت عکس دارد و با افزایش عدد گراشف اصلاح شده دمای بیشینه بی بعد کاهش و دمای بعددار افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه نصب کانال از 0 به 90 ، دمای بیشینه بی بعد به‌ازای $Gr^* = 5/2 \times 10^5$ ، $Gr^* = 1/0.5 \times 10^6$ و به‌ازای $Gr^* = 7/87 \times 10^5$ و $Gr^* = 1/0.5 \times 10^6$ کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش عدد گراشف به‌ازای مقدار ثابت عدد رینولدز، اثر جابه‌جایی طبیعی بیشتر می‌شود.



شکل ۴ خطوط جریان و منحنی‌های دما در $Re = 1400$ ، $Gr^* = 5/2 \times 10^5$ ، $Gr^* = 1/0.5 \times 10^6$ و $Gr^* = 7/87 \times 10^5$ و $Gr^* = 1/0.5 \times 10^6$ (a) $\varphi = 0$ و $k_h = 1/0.4$ و $\varepsilon_h = 0/55$ (b) $\varphi = 30$ (c) $\varphi = 60$ (d) $\varphi = 90$

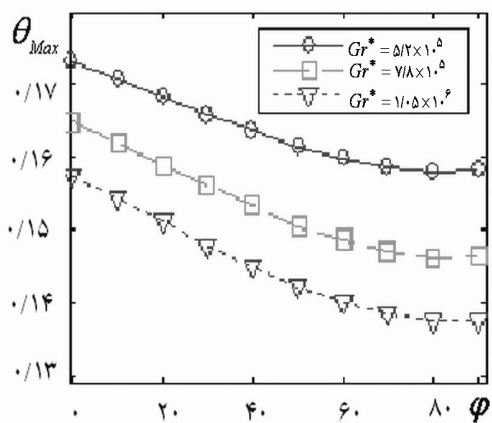


شکل ۳ خطوط جریان و منحنی‌های دما در $Re = 150$ ، $Gr^* = 1/0.5 \times 10^6$ ، $A = 10$ ، $k_s = 0/26$ و $k_h = 1/0.4$ و $\varepsilon_h = \varepsilon_s = 0/55$ (a) $\varphi = 0$ (b) $\varphi = 30$ (c) $\varphi = 60$ (d) $\varphi = 90$

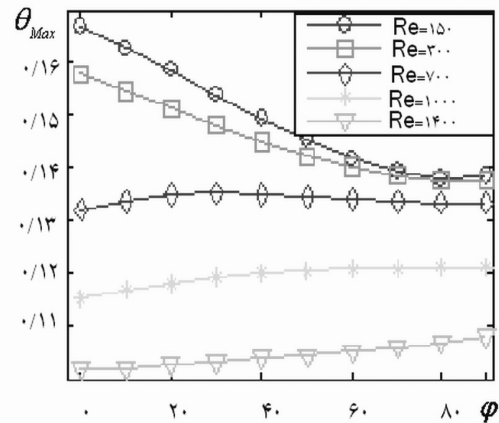
در فاصله زیر تراشه‌ها بر اثر انتقال حرارت هدایتی از تراشه به برد دمای برد بالاتر است. بعد از آخرین تراشه، به‌علت تشکیل گردابه‌ها و انتقال حرارت تشعشعی با محیط سرد بیرون از طریق خروجی کانال، دمای سطح به‌سرعت کاهش پیدا می‌کند. در نمودار سمت راست شکل ۶ دمای دیواره روبه‌رو منابع حرارتی ترسیم شده است. علت گرم شدن این دیواره، انتقال حرارت تشعشعی برد و تراشه‌ها به آن است.

۴-۲ بررسی اثر عدد گراشف اصلاح شده

عدد گراشف اصلاح شده به‌صورت $Gr^* = g\beta\Delta T_{ref}D^3/\nu^2$ تعریف می‌شود. برای بررسی اثر عدد گراشف اصلاح شده Gr^* بر خواص حرارتی و هیدرودینامیکی سیال، ابعاد ثابت فرض شده و فقط مقدار شار حرارتی تراشه‌ها تغییر می‌کند. در شکل ۷ سرعت سیال در خروجی کانال برای عددگراشف برابر $Gr^* = 5/2 \times 10^5$ و $Gr^* = 7/87 \times 10^5$ و $Gr^* = 1/0.5 \times 10^6$ و $Gr^* = 1/0.5 \times 10^6$ و زوایای مختلف در $Re = 150$ ترسیم شده است. در کانال

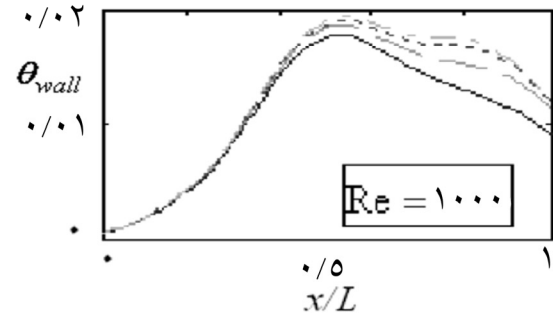
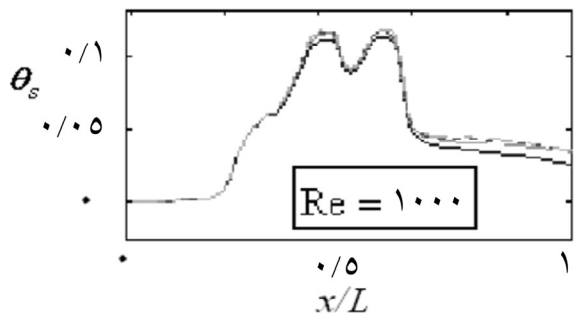
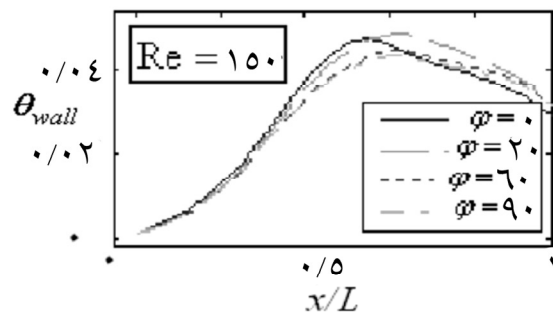
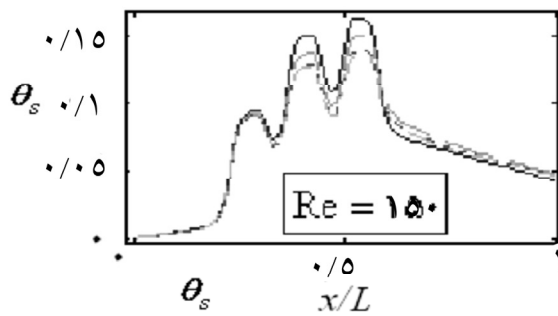


(ب)



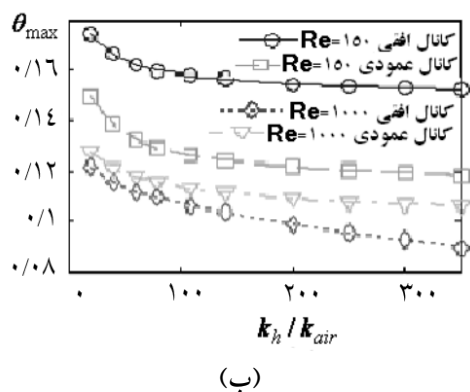
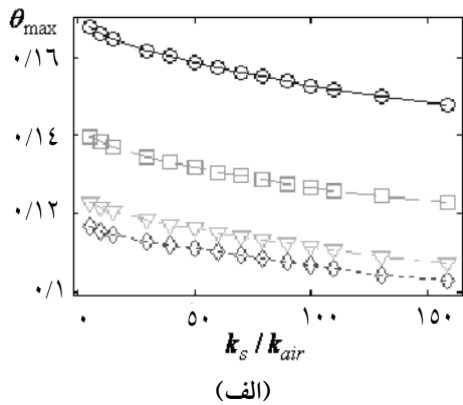
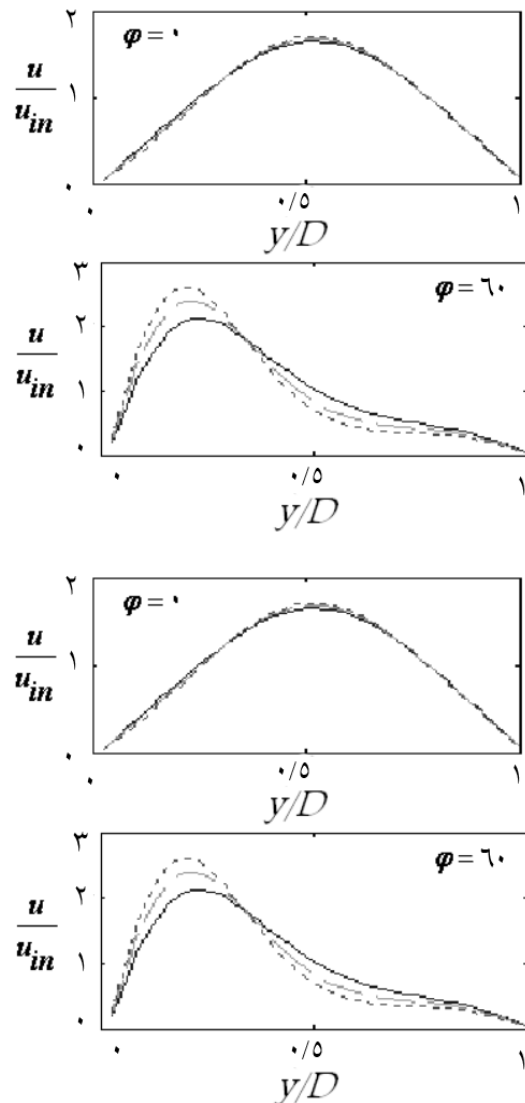
(الف)

شکل ۵ دمای بیشینه برحسب زاویه نصب و الف) عدد رینولدز ب) عدد گراشف



شکل ۶ دمای بی بعد دیواره‌های کانال به‌ازای $Gr^* = 7/18 \times 10^5$

و $Re=1000$ در دو حالت کانال افقی $\varphi=0$ و عمودی $\varphi=90$ ارائه شده است. با افزایش ضریب هدایت حرارتی بی بعد تراشه از ۲۰ به ۳۴۶ دمای ماکزیمم بدون بعد به ازای $Re=150$ و $\varphi=0$ ، 0.225 و در $\varphi=90$ ، 0.307 و به ازای $Re=100$ و $\varphi=0$ ، 0.325 و در $\varphi=90$ ، 0.218 کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش ضریب هدایت حرارتی بی بعد برد از ۵ به ۱۶۰ دمای ماکزیمم بدون بعد به ازای $Re=150$ و $\varphi=0$ ، 0.2 و در $\varphi=90$ ، 0.158 و به ازای $Re=1000$ و $\varphi=0$ ، 0.135 و در $\varphi=90$ ، 0.153 کاهش می‌یابد.



شکل ۷ پروفیل سرعت در انتهای کانال در زوایا و اعداد گراشف مختلف بازای $Re=150$

۳-۴ بررسی خواص برد و تراشه ها بر رفتار هیدرودینامیک و حرارتی سیال

۳-۴-۱ بررسی اثر ضریب هدایت حرارتی تراشه و برد در شکل شماره ۸ دمای ماکزیمم بدون بعد بر حسب ضریب هدایت حرارتی تراشه ها و برد به ازای $Re=150$

شکل ۸ دمای بیشینه بر حسب ضریب هدایت حرارتی الف)

برد ب) تراشه به ازای $Gr^* = 1/05 \times 10^6$

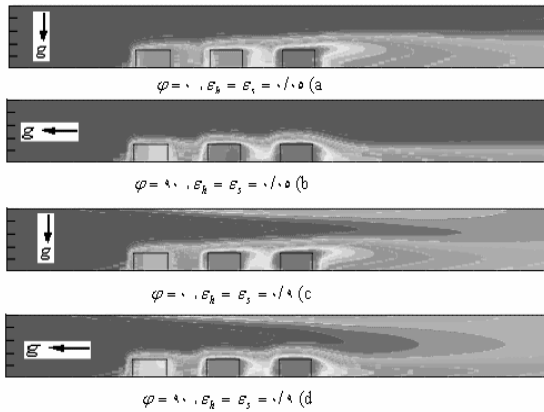
۴-۳-۲ بررسی ضریب صدور دیواره و برد

به‌علت کم‌اثر بودن ضریب صدور تراشه‌ها، نتایج فقط برای ضریب صدور دیواره‌ها ارائه شده و در تمامی موارد ضریب صدور تراشه‌ها برابر ضریب صدور برد فرض شده است. در شکل ۹ توزیع دماب‌به‌ازای $\text{Re} = 150$ و $\mathcal{E}_h = \mathcal{E}_s = 0/9$ و $\varphi = 0/5$

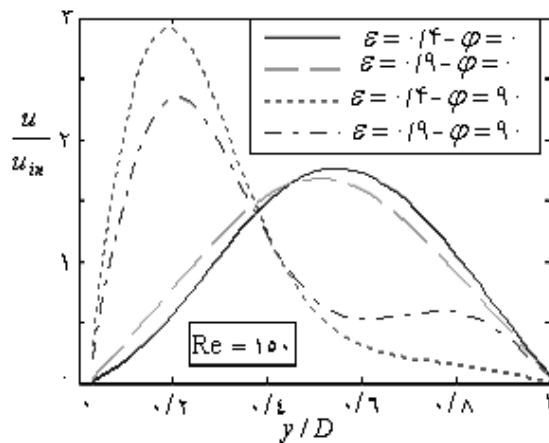
$Gr^* = 1/05 \times 10^6$ و ابعاد پایه نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های ۹(a) و ۹(c) مشاهده می‌شود که به‌ازای ضریب صدور پایین (0/05) بعلت کم شدن انتقال حرارت تشعشعی از برد و تراشه‌ها به دیواره مسطح مقابل، دمای آن تغییر نکرده و گرم نمی‌شود. اما به‌ازای $\mathcal{E}_h = \mathcal{E}_s = 0/9$ ، انتقال حرارت تشعشعی افزایش می‌یابد و دمای دیواره مسطح نیز بالا رفته و باعث به‌وجود آمدن لایه‌ای مرزی حرارتی بر روی دیوار مسطح می‌شود.

این لایه مرزی در اعداد کوچک رینولدز در وسط کانال، به لایه مرزی تشکیل شده روی برد می‌رسد اما در اعداد رینولدز بالاتر، تا انتهای کانال ادامه پیدا می‌کنند و بهم نمی‌رسند. در شکل ۱۰ پروفیل سرعت در انتهای کانال به‌ازای ضرایب مختلف صدور و $Gr^* = 1/05 \times 10^6$ و ابعاد پایه ترسیم شده است. در یک کانال افقی $\varphi = 0$ ، پروفیل سرعت با تغییر ضریب صدور تغییر محسوسی نمی‌کند. با افزایش زاویه نصب کانال تأثیر ضریب صدور بر سرعت سیال بیشتر می‌شود. در یک کانال عمودی $\varphi = 90$ و $\mathcal{E}_h = \mathcal{E}_s = 0/4$ به‌علت کم بودن انتقال حرارت تشعشعی، دیواره مسطح به اندازه کافی گرم نیست که باعث راندن سیال به سمت بالا شود و همان‌طور که در شکل به‌صورت نقطه چین نشان داده شده، فقط در طرف برد اصلی، سیال سرعت بیشتری گرفته است. با افزایش ضریب صدور به 0/9، دمای دیواره مسطح و

سرعت سیال در نزدیکی آن بیشتر می‌شود. با افزایش عدد رینولدز و غالب شدن جابه‌جایی اجباری، اثر تشعشع سطحی بر سرعت کمتر می‌شود.



شکل ۹ توزیع دماب‌به‌ازای $\mathcal{E}_h = \mathcal{E}_s = 0/05$ و $Gr^* = 1/05 \times 10^6$ و $\text{Re} = 150$ و $\mathcal{E}_h = \mathcal{E}_s = 0/9$



شکل ۱۰ پروفیل سرعت در انتهای کانال برحسب ضرایب صدور مختلف به‌ازای $Gr^* = 1/05 \times 10^6$

در شکل ۱۱ دمای بیشینه بی بعد بر حسب ضرایب صدور و زوایای نصب مختلف ترسیم شده است. با افزایش ضریب صدور برد و تراشه از 0/4 به 0/8 دمای

۲- در اعداد بالای رینولدز جابه‌جایی اجباری غالب است و با افزایش زاویه نصب کانال -به‌علت کم شدن قدرت گردابه بعد از آخرین تراشه و کمتر شدن قدرت مکش در انتهای کانال- دمای بیشینه تا $3^\circ C$ درجه سانتی‌گراد به‌ازای $Re = 1400$ افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش عدد گراشف به‌ازای اعداد رینولدز کم $Re < 500$ دمای بیشینه در کانال افقی تا $30^\circ C$ و در کانال عمودی تا $24^\circ C$ افزایش پیدا می‌کند. اما در اعداد بالاتر رینولدزهای دمای بیشینه در کانال افقی تا $21/5^\circ C$ و در کانال عمودی تا $22^\circ C$ افزایش پیدا می‌کند که نشان می‌دهد عدد گراشف در حالت جابه‌جایی طبیعی اثر بیشتری بر دما دارد.

۴- با افزایش ضریب هدایت حرارتی برد، دمای بیشینه در کانال افقی تا $14/5\%$ و در کانال عمودی تا $15/7\%$ کاهش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن هدایت حرارتی برد در حل عددی است. با افزایش ضریب صدور دیواره‌ها، دمای بیشینه تا 17% کاهش پیدا می‌کند.

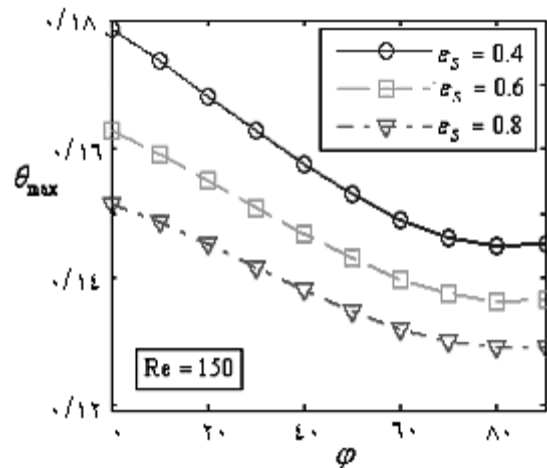
۵- همچنین ضریب صدور اثر قابل ملاحظه‌ای را بر پروفیل سرعت در کانال شیب‌دار نشان می‌دهد. بنابراین در نظر گرفتن تشعشع در حل عددی لازم است.

۶- وقتی سرعت فن کم باشد یا از جابه‌جایی طبیعی برای سرمایش استفاده می‌شود، باید طراحی کانال به‌صورت شیب دار یا تا حد ممکن به‌صورت عمودی باشد.

۶- فهرست علائم

D	عرض کانال (mm)
D_h	ارتفاع تراشه (mm)
$F_{i,j}$	ضریب شکل از المان i به المان j

بیشینه بی بعد به‌ازای $Re = 150$ و $\varphi = 0$ ، $0/0273$ و در $\varphi = 90$ ، $0/0158$ و به‌ازای $Re = 1000$ و $\varphi = 0$ ، $0/0226$ و در $\varphi = 90$ ، $0/0252$ کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱ دمای بیشینه بی بعد بر حسب ضریب صدور و زاویه نصب به‌ازای $Gr^* = 1/05 \times 10^6$

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حل عددی جابه‌جایی مختلط حالت پایا، لایه‌ای و تراکم‌ناپذیر با در نظر گرفتن تشعشع و هدایت حرارتی دیواره‌ها در برد الکترونیکی با سه تراشه مولد گرما در زوایای نصب مختلف با فرض هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده ارائه شده است. به‌ازای محدوده ابعاد داده شده، نتایج زیر به‌دست آمده است.

۱- در اعداد کم رینولدز ($Re < 500$) با بیشتر شدن زاویه نصب، اثر جابه‌جایی طبیعی بیشتر شده و باعث افزایش سرعت سیال در کنار دیواره‌های داغ و کاهش دمای بیشینه تا $12^\circ C$ درجه سانتی‌گراد در $Re = 150$ می‌شود. همچنین در اعداد کوچک رینولدزهای با افزایش زاویه نصب، طول گردابه‌های بین تراشه‌ها و بعد از آخرین تراشه به‌سرعت کم می‌شود.

$(0.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4)$		عدد گراشف اصلاح	Gr^*
θ دمای بی بعد $(\frac{T - T_{in}}{\Delta T_{ref}})$		شده $(g\beta\Delta T_{ref} D^3 / \nu^2)$	
φ زاویه نصب کانال نسبت به افق		شار تابش ورودی (W/m^2)	J
α ضریب پخش حرارتی (m^2/s)		ضریب هدایت حرارتی (W/mk)	k
Subscripts		طول کانال (mm)	L
in ورودی		طول تراشه‌ها (mm)	L_h
s زیرلایه		فاصله تراشه‌ها (mm)	L_c
h منبع گرمایی		فاصله اولین تراشه از ورودی کانال (mm)	L_1
max مقدار		عدد پراتنل (ν/α)	Pr
ref مقدار مرجع		فشار دینامیکی بی بعد $p/\rho u_{in}^2$	P
int میانی		شار حرارتی تولیدی در تراشه‌ها (W/m^2)	q_v
		شار حرارتی تابشی (W/m^2)	q_r
		عدد رینولدز $(u_{in} D / \nu)$	Re_D
		دما (K)	T
		ضخامت دیوار کانال (mm)	t
		سرعت سیال (m/s)	u
		سرعت بی بعد $(\frac{u}{u_{in}})$	U
		سرعت سیال (m/s)	v
		سرعت بی بعد $(\frac{u}{u_{in}})$	V
		مختصات بی بعد $(\frac{y}{D}, \frac{x}{D})$	X, Y
		اختلاف دمای بی $(q_v L_h D_h / k_{air})$	ΔT_{ref}
		Greek symbols	
		متغیر بی بعد	$\phi_{i,j}$
		ضریب انبساط هم‌فشار سیال	β
		معیار همگرایی	\mathfrak{R}
		ضریب صدور سطح	ε
		سینماتیک سیال (m/s^2)	ν
		ثابت استفتن بولتزمن	σ

۷- منابع

- [1] C. Yucel, M. Hasnaoui, L. Robillard, E. Bilgen, Mixed convection heat transfer in open ended inclined channels with discrete isothermal heating, Numer. Heat Transfer A 24 (1993) 109–126.
- [2] C.Y. Choi, A. Ortega, Mixed convection in an inclined channel with a discrete heat source, Int. J. Heat Mass Transfer 36 (1993) 3119–3134.
- [3] S.H. Kim, A.K. Anand, Laminar developing flow and heat transfer between a series of parallel plates with surface mounted discrete heat sources, Int. J. Heat and Mass Transfer 37 (1994) 2231–2244.
- [4] C. Balaji, S.P. Venkateshan, Combined conduction, convection and radiation in a slot, cavity, Int. J. Heat and Fluid Flow 14 (1995) 260–267
- [5] T. Furukawa, W. Yang, Thermal fluid-flow in parallel boards with heat generating blocks, Int. J. Heat and Mass Transfer 46 (2003) 5005–5015
- [6] A. Dogan, M. Sivrioglu, S. Baskaya, Experimental investigation of mixed convection heat transfer in a rectangular

- [10] M.A.R. Sharif, Laminar mixed convection in shallow inclined driven cavities with hot moving lid on top and cooled from bottom. *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 1036–1042
- [11] S.H.Kim, N.K.Anand, L.S.Feltcher, Free convection between series of vertical parallel plates with embedded line heat sources, *J. Heat transfer* 113(1991)108–115
- [12] H.C. Hottel, A.F. Saroffim, *Radiative Heat Transfer*, McGraw Hill, New York, 1967.
- [13] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York, 1980.
- channel with discrete heat sources at the top and at the bottom, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 32 (2005) 1244–1252 *Heat Mass Transfer* 44 (2001) 55–61.
- [7] B. Premachandran, C. Balaji, Conjugate mixed convection with surface radiation from a horizontal channel with protruding heat sources, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 49 (2006) 3568–3582
- [8] G. Madhusudhana Rao, G.S.V.L. Narasimham, Laminar conjugate mixed convection in a vertical channel with heat generating components, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 3561–3574
- [9] L. Martı́nez-Sua´sstegui a, C. Treviño, Particle image velocimetry measurements for opposing flow in a vertical channel with a differential and asymmetric heating condition, *Experimental Thermal and Fluid Science* xxx (2007) xxx–xxx