مجلهٔ فنی و مهندسی مدرس- مکانیک
دورهٔ دهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۸۹

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، صندوق‌پستی ۱۹۹۹- ۱۹۳۹۵
alibehbahaninia@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 شده‌است. 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 وبیشینه دمای تولید شده در تراشه به‌ازای زاویه نصب $۰ < \varphi < ۹۰$ و سرعتهای مختلف فن، بر پایه عدد رینولدز در محدوده $۱۵۰ < Re_D < ۱۴۰۰$ و شار حرارت تولیدی در تراشه‌ها بر پایه عدد گراشف در محدوده $۷\times۱۰^{۴} - ۱/۲\times۱۰^{۶}$ ارائه شده است. بیشترین تأکید بر مقایسه دو حالت مختلف طراحی برد به‌صورت افقی $\varphi = ۰$ و عمودی $\varphi = ۹۰$ 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. Shirzadi[1], A. Behbahani-nia[2*], M. Ghasemi[3]
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**
alibehbahaninia@kntu.ac.ir

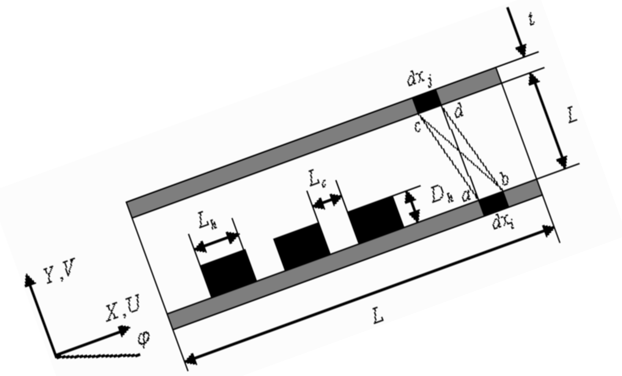
Abstract
Numerical solution for mixed convection combined with surface radiation in an inclined channel containing three protruding heat sourcesis investigated in this article. This combinationre present printed circuit boards in electrical equipments. Air is assumed to be the working fluid which is laminar, steady, incompressible and thermally and hydrodynamicaly developing. Governing equations are discretized using the F.V. method in an staggered domain and 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 valuesof fan velocity as Reynolds number 150<Re<1400 and heat generated in chips as Grashof number $1 < Gr < 1.2\times10^7$ and channel installation angel $0 < \phi < 90$. 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 angel increase from 0 to 90 but in forced convection regime, maximum temperature increases 30 centigrade.

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

۱- مقدمه

بـا پیـشرفت روزافـزون فنـاوری سـاخت، تجهیـزات الکترونیکی کوچکتر و یا بـازدهی بیـشتر و دارای شـار حرارتی بیشتری شده‌اند. یکی از موارد مهم در طراحـی و نگهـداری تجهیـزات گرمـازای الکترونیکـی، بهبـود روش‌های سرمایش بـرای کـارکرد در دمـای مطمـئن و ایمن است. هوا به‌عنـوان سـیال خنـک کننـده بـه‌دلیـل مـسائل اقتـصادی و ایمنـی، در بیـشتر مـوارد اسـتفاده می‌شود. نتایج عددی برای کانال شیبدار و دارای منـابع گرمایی هم‌دما توسط یوسل [۱] ارائه شده است. چائو و ارتگا [۲] نیز به بررسی جابه‌جایی مختلط در کانـال شیبدار با منابع گرمایی با شار یکنواخـت پرداختـه‌انـد. کیم و آنانانd [۳] به بررسی جابـه‌جـایی اجبـاری بـرای منابع گرمایی برجسته پرداخته‌اند و با به‌کار بردن شـرط مرزی تکرار شونده در عرض کانال، نتایج را برای یـک دسته برد الکتریکی ارائه کرده‌اند. بالاجی [٤] به بررسی جابه‌جایی طبیعی در شکاف با در نظر گـرفتن تشعـشع سطحی و هدایت در دو دیواره عمودی و یـک دیـواره همدما به‌ازای اعـداد مختلـف رایلـی پرداختـه اسـت. فوروکاوا [٥] به بررسی جابـه‌جـایی اجبـاری در یـک دسته برد افقی که دارای منابع حرارتی برجـسته باشـند پرداخته امّا فقط هدایت و جابه‌جایی را در نظـر گرفتـه است. نتایج تجربی در کانال افقی کـه دارای دو ردیـف منبع گرمایی به‌صورت ۴×۸ در دیواره پایینی و بـالایی نـصب شـده، توسـط دوقـان [٦] ارائـه شـده اسـت. او نسبتهای طول به عرض برابر ۲، ٤و۱۰ را به‌ازای اعـداد مختلف رینولدز و گراشف مختلف بررسی کرده اسـت. بالاجی [۷] با در نظر گرفتن تشعشع سطحی و هـدایت در فاز جامد، به بررسی جابـه‌جـایی مختلط در کانـال افقی با ٤ منبع گرمایی برجسته پرداخته و با ثابت فرض کردن هندسه کانال بـه بررسـی اثـر ضـریب هـدایت و ضریب صدور برد و منابع حرارتی پرداخته است. رائـو [۸] به بررسی جابه‌جایی مختلط بدون در نظر گـرفتن تشعشع در یک دسته برد که بـه‌صـورت عمـودی قـرار دارند، پرداخته است. بر طبق نتـایج حاصـل، ٤۱ تـا ٤۷ درصداز گرمای تولید شده در تراشه‌ها توسـط هـدایت حرارتی در برد منتقل مـی‌شـود. مـارتینز [۹] بـصورت تجربی بـه بررسـی جابـه‌جـایی مخـتلط بـرای اعـداد رینولدز ۳۰۰ تا۷۰۰ در کانـال عمـودی -کـه بـصورت نامتقارن گرم می‌شود و جهت نیروی شـناوری مخـالف جریان اصلی است- پرداخته‌است و نشان داده است که نیـروی شـناوری در اطـراف دیـواره‌هـای داغ، باعـث نامتعادل کردن جریان و به‌وجود آمدن گردابـه‌هـایی در آن می‌شود. شریف [۱۰] به بررسی اثر شیب حفـره بـر جابه‌جایی مختلط در حفره‌ای دو بعدی کـه دارای یـک دیواره‌ای متحرک است، بدون در نظـر گـرفتن تشعـشع پرداخته و نشان می‌دهد کـه بـا افـزایش زاویـه حفـره، مقدار متوسط عدد نوسلت افزایش می‌یابد.

با بررسی کارهای انجام شده مشاهده مـی‌شـود کـه فقط در دو مورد از تحقیقات، تشعشع سطحی در نظـر گرفته شده است. همچنین تحقیقـی در مـورد بررسـی اثر شیب کانال و تشعشع سـطحی در بـردی بـا منـابع حرارتی برجسته و با در نظر گرفتن همزمـان هـدایت، جابه‌جایی و تشعشع انجام نشده است. همچنین بـا آن که تحقیقات و متنوعی درزمینه جابه‌جـایی مخـتلط در کانال عمودی و افقی به‌طور جداگانه انجام شـده، امـا تا کنون مقایسه جامعی بین طراحی تجهیـزات گرمـازا به‌صورت افقی یا عمودی انجـام نـشده‌اسـت. در ایـن مقاله به‌این موضوع به عنـوان یکـی از اهـداف اصـلی پرداخته شده است.



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 الکترنیکی با سه تراشه مولد گرما است. برد می‌تواند به‌صورت افقی ، عمودی یا با زاویه نصب φ نسبت به افق قرار گیرد . هدایت حرارتی در برد و تراشه ها 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 ($pr = ۰.۷۱$) 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 به‌صورت 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 $L = ۲۵۰mm$، عرض کانال $D = ۲۵mm$، فاصله اولین تراشه با ورودی $L_۱ = ۶۰mm$، طول تراشه $L_h = ۱۵mm$، ارتفاع تراشه $D_h = ۷/۵mm$، فاصله بین تراشه‌ها $L_c = ۲۰mm$، ضریب هدایت حرارتی برد $k_s = ۰/۲۵$ و ضریب هدایت حرارت تراشه $k_h = ۱/۰۴$ و ضریب صدور تراشه‌ها $\varepsilon_h = /۵۵$ و ضریب صدور برد $\varepsilon_s = ۰/۵۵$ بعنوان ابعاد پایه فرض شده‌است. 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 به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

$$, P = \frac{p}{\rho u_{in}^{۲}},\ \Delta T_{ref} = q_v L_h D_h / k_{air}$$

با صرف‌نظر از اتلاف لزجت و اثر تراکم‌پذیری هوا، معادلات حاکم بی بعد برای دو فاز سیال و جامد به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = ۰ \qquad (۱)$$

$$U\frac{\partial U}{\partial X} + V\frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{۱}{\mathrm{Re}_D}\left(\frac{\partial^۲ U}{\partial X^۲} + \frac{\partial^۲ U}{\partial Y^۲}\right) + \frac{Gr^*}{\mathrm{Re}_D^۲}\theta \sin\varphi \qquad (۲)$$

$$U\frac{\partial V}{\partial X} + V\frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{۱}{\mathrm{Re}_D}\left(\frac{\partial^۲ V}{\partial X^۲} + \frac{\partial^۲ V}{\partial Y^۲}\right) + \frac{Gr^*}{\mathrm{Re}_D^۲}\theta \cos\varphi \qquad (۳)$$

$$\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}_{air}\left(U\frac{\partial \theta}{\partial X} + V\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right) = \frac{k}{k_{air}}\left(\frac{\partial^۲ \theta}{\partial X^۲} + \frac{\partial^۲ \theta}{\partial Y^۲}\right) + \frac{D^۲}{L_h D_h}\delta \qquad (۴)$$

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

انتقال حرارت تشعشعی سطحی در داخل کانال از روش محفظه[1] و به کمک فرمول‌بندی رادیوسیتی[2] محاسبه شده است. برای این منظور دیواره‌های داخل کانال به‌صورت سطح دیفیوز و خاکستری و ورودی و خروجی کانال بصورت دیوار سیاه در دمای محیط و هوا از نظر تشعشعی شفاف[3] 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 محاسبه‌گردیده و سپس از رابطهٔ زیر استفاده شده است.

$$F_{i,j}=\frac{L_{ad}+L_{bc}-L_{ac}-L_{bd}}{۲dx_i} \qquad (۵)$$

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

$$j_i=\varepsilon_i\sigma T_i^{۴}+(۱-\varepsilon_i)\sum_{j=۱}^{n}F_{ij}j_j \qquad (٦)$$

با محاسبه شار گرمای خروجی از هر المان می‌توان شار گرمایی خالص تشعشی از آن را محاسبه و آن را به معادله انرژی اضافه کرد. شار گرمایی خالص تشعشی از رابطه زیر برای هر المان i محاسبه می‌شود:

$$q_r=\frac{\sigma T_i^{۴}-J_i}{(۱-\varepsilon_i)/\varepsilon_i} \qquad (۷)$$

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

جدول ۱ محدوده پارامترهای مورد استفاده

$$۱۵۰<\mathrm{Re}_D<۱۴۰۰$$
$$۷\times۱۰^{۴}<Gr^{*}<۱/۲\times۱۰^{٦}$$
$$۱۹<k_g/k_{air}<۲۵۰$$
$$۵<k_s/k_{air}<۱٦۰$$
$$۰/۴<\varepsilon_s<۰/۹$$
$$۰/۴<\varepsilon_g<۰/۹$$
$$۰<\varphi<\pi/۲$$

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:

$$k_{\text{int}}=\frac{k_{air}k_s}{k_{air}\dfrac{\partial e^-}{\partial e}+k_s\dfrac{\partial e^+}{\partial e}} \qquad (۸)$$

شرایط مرزی حاکم بر مسأله به‌صورت زیراست:

- ورودی $۰\le Y\le ۱$ و $X=۰$

$$U=۱\ ,\ V=۰\ ,\ \theta=۰ \qquad (۹)$$

- خروجی $۰\le Y\le ۱$ و $X=\dfrac{L}{D}$

$$\frac{\partial V}{\partial X}=۰,\quad \frac{\partial\theta}{\partial X}=۰\qquad if \qquad (۱۰)$$
$$U>۰,\ \theta=۰\ \ if\ \ U\le۰$$

- دیواره‌ها $۰\le X\le\dfrac{L}{D}$ و $Y=-\dfrac{t}{D}$ و $Y=۱+\dfrac{t}{D}$

$$\frac{\partial\theta}{\partial Y}=۰ \qquad (۱۱)$$

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 به‌صورت عایق فرض

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 به‌کمک الگوریتم سیمپل برای متغیرهای U، V، P، θ و J^* حل شده است. برای گسسته سازی جملهٔ جابه‌جایی /پخش از روش پاورلاو[1] استفاده شده است. برای محاسبه هدایت حرارتی ، جابه‌جایی و تشعشع از شبکه‌ای تک‌ناحیه‌ای غیریکنواخت و جابه‌جا[2] در کل ناحیه حل استفاده شده است. برای حل معادله تشعشع (٦) دما از مرحله قبلی در جملهٔ $\varepsilon_i \sigma T_i^{4}$ قرار داده شده و این جملهٔ به‌صورت جملهٔ منبع در معادله قرار گرفته و معادله حل می‌شود.

در نزدیکی سطوح جامد تعداد گره‌ها به‌علت بیشتر بودن گرادیان سرعت و دما بیشتراست. برای همگرایی سریعتر ضرایب تخفیف برای U، V، P، θ، J^* به‌ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۷، ۰/۶، ۰/۸۵ و ۰/۶ انتخاب شده است . برای حل دستگاه معادلات به‌دست آمده برای هدایت و جابه‌جایی از روش ماتریس سه‌قطری[3] و برای تشعشع از روش گوس سایدل استفاده شده است. معیار همگرایی برای متغیرهای مسأله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

1. Power law
2. Staggered
3. TDMA

به‌منظور به‌دست آوردن نتایج مستقل از اندازه شبکه به‌ازای $\mathrm{Re} = 300$ و زاویه نصب $\varphi = 0$ و ابعاد مرجع، با تغییر دادن تعداد اندازه شبکه‌ها، تغییرات دمای بیشینه را بررسی می کنیم که نتایج آن در جدول (۲) آمده است . در زبرترین حالت شبکه دمای بیشینه با ریزترین حالت حدود۳٪ اختلاف دارد. بنابراین در کل محاسبات اندازه شبکه برابر ۵۶×۳۴۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ دمای بیشینه بی بعد بـه‌ازای $Gr^* = 7.87 \times 10^5$ ، $\mathrm{Re} = 300$ ، $\varphi = 0$ و ابعاد پایه

دمای بیشینه $\theta_{\max}$	تعداد گره‌ها در جهت Y	تعداد گره‌ها در جهت X
۰/۱۷۹۸	۳۰	۲۰۰
۰/۱۸۲٤	٤۰	۲۸۰
۰/۱۸٤٦۸	٤٥	۳٤۰
۰/۱۸٤٦۲	٥٦	۳٤۰
۰/۱۸٤۸٥	٦٤	۳٤۰

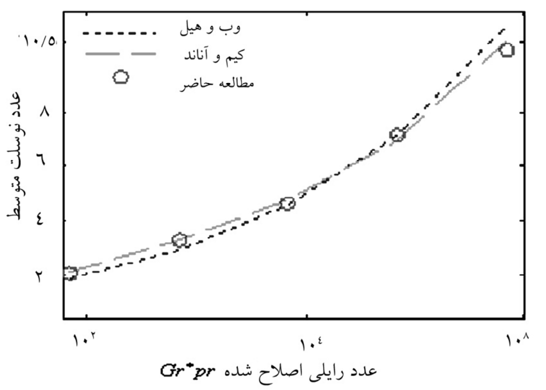
تأیید صحت نتایج عددی حاصل با مقایسه نتایج عددی و تجربی ارائه شده توسط کیم [۱۱] برای جابه‌جایی طبیعی در یک دسته کانال عمودی و بدون مانع انجام شده است. در شکل ۲ عدد متوسط نوسلت به‌دست آمده از کارهای تجربی و عددی مقایسه شده‌است. نتایج عددی دقت مناسبی در مقایسه با نتایج تجربی دارند و بیشترین اختلاف آن برابر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

٤- بحث و ارائه نتایج

٤-۱- بررسی اثر عدد رینولدز

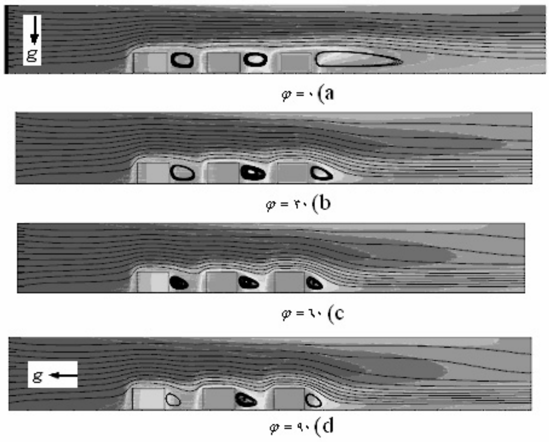
در شکل ۳ بازای ابعاد مرجع و چهار زاویه مختلف نصب و $\mathrm{Re} = 150$ و $Gr^* = 1.055 \times 10^5$، منحنی‌های دما و خطوط جریان نشان داده شده است. در حالت $\varphi = 0$

بزرگ بودن جملهٔ $\frac{Gr^*}{Re_D^{۲}}\theta\cos\varphi$ در معادله (۳) و عمـود بودن نیروی شناوری بر جریـان، باعـث بـالا رفـتن سـیال اطراف دیواره‌هـای گـرم و ضـخیم شـدن لایـه مـرزی در انتهای کانال می‌شود. با افزایش زاویه نصب به $\varphi = ۳۰$ و اضافه شدن جملهٔ $\frac{Gr^*}{Re_D^{۲}}\sin\varphi$ بـه معادلـه (۲)، انـدازه و قدرت گردابه های بین تراشه‌ها و بعد از آخرین آنها کمتر می‌شود. در این حالت به‌علت بیشتر شـدن سـرعت سـیال در کناره تراشه ها، دمای بیشینهٔ در تراشه‌ها کمتر می‌شـود. بۀازای $\varphi = ۶۰$ نیز وضعیت به همین صورت است.



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

در حالت طراحی کانال به‌صورت عمودی $\varphi = ۹۰$، اثر جابه‌جایی طبیعی و اجباری با یکـدیگر جمـع مـی‌شـده و باعث افزایش سـرعت سـیال و کـاهش دمـای بیـشینه بـه بیشترین حد خود می شود. با دقت در توزیع دما در شکل ۳ مشاهده می‌شود که دمای اولین تراشه به‌علت برخورد با هوای تازه و تشعشع بیشتر با محـیط بیـرون ، کمتـر از دو تراشه دیگر است. در شکل ٤ بۀازای ابعاد مرجع و چهـار زاویه مختلف نصب و $Re = ۱۴۰۰$ و $Gr^* = ۱/۰۵۵\times ۱۰^{۵}$، منحنی‌های دما و خطوط جریان نشان داده شده است. بـا افزایش عدد رینولـدز Re جملـهٔ $\frac{Gr^*}{Re_D^{۲}}$ در معـادلات مومنتم (۲)و (۳) به‌سرعت کاهش‌می یابد و در نتیجه سهم جابه‌جایی طبیعـی بـر رفتـار سـیال کمتـر شـده و سـهم جابه‌جایی اجباری بیشتر می‌شود. در $Re = ۱۴۰۰$ به‌علت بیشتر بودن سرعت سـیال، گردابـه‌هـای بزرگتـری نـسبت به $Re = ۱۵۰$ تشکیل می‌شود که این گردابه‌ها تـا انتهـای کانـال ادامـه داشـته و باعـث وارد شـدن سـیال سـرد در خروجی کانال می شود. از آنجا که در یک کانال افقی این گردابه ها قویتر و دارای طول بیـشتری نـسبت بـه کانـال عمودی است، سیال سرد بیشتری از سـمت خروجـی بـه کانال وارد شده و باعث کـاهش بیـشتر دمـا مـی‌شـود. در شکل 5a دمای بیشینه ایجاد شده در تراشه به‌ازای زوایـای مختلف نصب و اعداد مختلف رینولدز ترسیم شده اسـت. با ثابت نگاه داشتن خواص فیزیکی و هندسی، همواره بـا افزایش عدد رینولدز دمای بیشینه کاهش می‌یابد. در اعداد رینولدز کم -که جابه‌جایی طبیعی سهم بیـشتری دارد- بـا افزایش زاویـه نـصب از حالـت افقـی $\varphi = ۰$ بـه حالـت عمـودی $\varphi = ۹۰$ دمـای، بیـشینه بـی بعـد در $Re = ۱۵۰$ و $Re = ۳۰۰$ به‌ترتیب ۲۱٪ و ۱۵٪ کـاهش و در $Re = ۷۰۰$ و $Re = ۱۰۰۰$ به ترتیب ۱/۱٪ و ٤/٦٪ افزایش می‌یابد که ناشی از کاهش طول گردابـه هـا و کـاهش میـزان سـیال ورودی در انتهای کانال اسـت. در شـکل ٦ دمـای بـرد و دیـــواره کانـــال بـــه‌ازای عـــدد رینولـــدز $Re = ۱۵۰$ و $Re = ۱۰۰۰$ و زوایـای مختلـف ترسـیم شـده اسـت. به‌علت تشعشع با محیط بیرون و تمـاس بـا هـوای تـازه، دمای سمت ورودی برد و دیواره کم است.

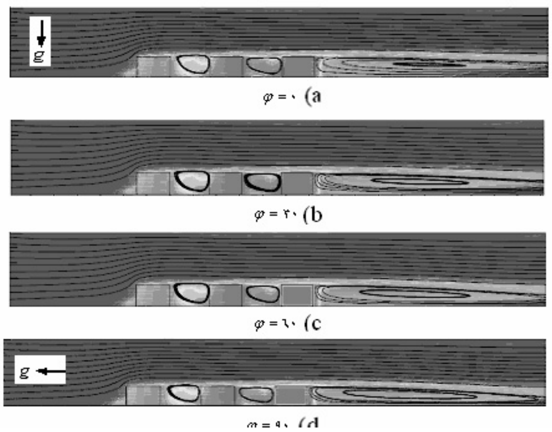


شکل ۳ خطوط جریان و منحنی‌های دما در Re=۱۵۰، $Gr^* = ۱/۵۰۵\times ۱۰^{۶}$ ، $A = ۱۰$ ، $k_s = ۰/۲۶$ و $k_h = ۱/۰۴$ و $\varepsilon_h = \varepsilon_s = ۰/۵۵$ (a $\varphi = ۰$ (b $\varphi = ۳۰$ (c $\varphi = ۶۰$ (d $\varphi = ۹۰$

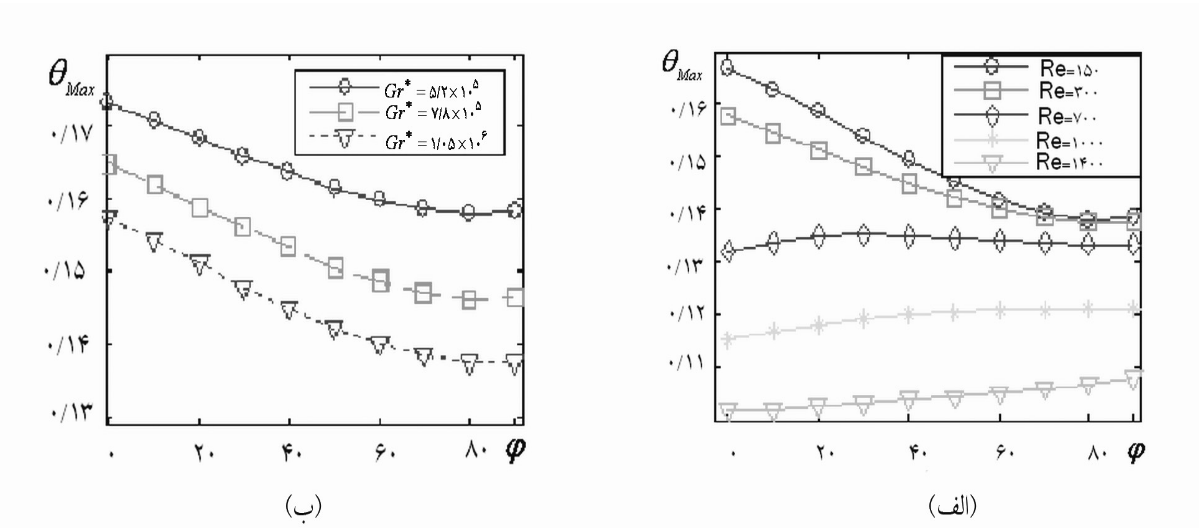
در فاصله زیر تراشه‌ها بر اثر انتقال حرارت هدایتی از تراشه به برد دمای برد بالاتر است. بعد از آخرین تراشه، به‌علت تشکیل گردابه‌ها و انتقال حرارت تشعشعی با محیط سرد بیرون از طریق خروجی کانال، دمای سطح به‌سرعت کاهش پیدا می‌کند. در نمودار سمت راست شکل ٦ دمای دیواره روبه‌رو.منابع حرارتی ترسیم شده است. علت گرم شدن این دیواره، انتقال حرارت تشعشعی برد و تراشه‌ها به آن است.

٤-٢ بررسی اثر عدد گراشف اصلاح شده

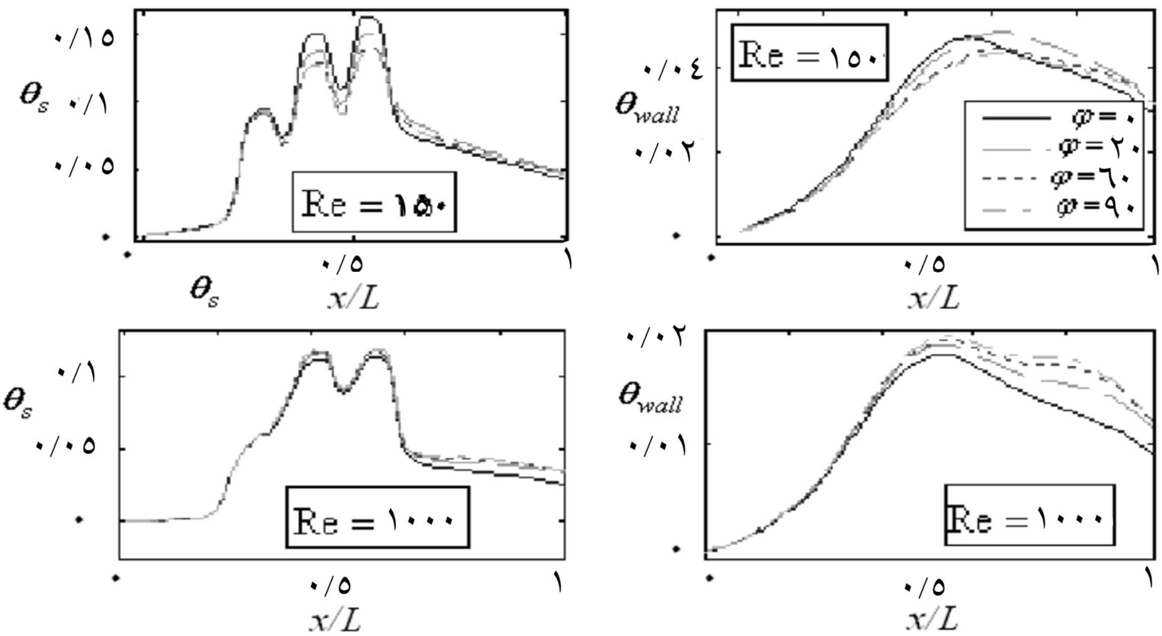
عدد گراشف اصلاح شده به‌صورت $Gr^* = g\beta\Delta T_{ref}D^{۳}/\upsilon^{۲}$ تعریف می‌شود. برای بررسی اثر عدد گراشف اصلاح شده Gr^* بر خواص حرارتی و هیدرودینامیکی سیال، ابعاد ثابت فرض شده و فقط مقدار شار حرارتی تراشه‌ها تغیر می‌کند. در شکل ۷ سرعت سیال در خروجی کانال برای عددگراشف برابر $Gr^* = ۵/۲\times ۱۰^{۵}$ و $Gr^* = ۷/۸۷\times ۱۰^{۵}$ و $Gr^* = ۱/۰۵\times ۱۰^{۶}$ و زوایای مختلف در $Re = ۱۵۰$ ترسیم شده است. درکانال افقی($\varphi = ۰$) ، پروفیل سرعت به شکل سهمی بوده و تغیر 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 $\varphi = ۹۰$ حاصل‌می‌شود زیرا جابه‌جایی طبیعی و جابه‌جای اجباری کاملا همجهت می‌شوند. در شکل (b)۵ دمای بیشینه بی بعد به‌ازای زوایای مختلف نصب اعداد مختلف گراشف در $Re = ۳۰۰$ 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 ۰ به ۹۰، دمای بیشینه بی بعد به‌ازای $Gr^* = ۵/۲\times ۱۰^{۵}$، ٪۱۰/۷ و به ازای $Gr^* = ۷/۸۷\times ۱۰^{۵}$، ٪۱۳/۷ و به‌ازای $Gr^* = ۱/۰۵\times ۱۰^{۶}$، ٪۱۵/٤ کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش عدد گراشف به‌ازای مقدار ثابت عدد رینولدز، اثر جابه‌جایی طبیعی بیشتر می‌شود.



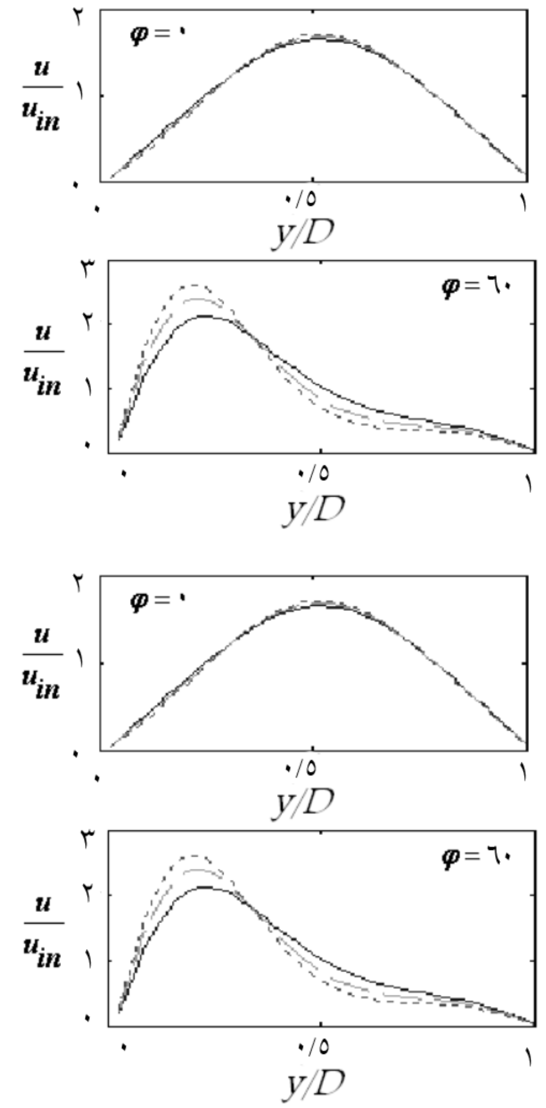
شکل ٤ خطوط جریان و منحنی‌های دما در Re=۱٤۰۰، $Gr^* = ۱/۰۵۰۵\times ۱۰^{۶}$ ، $A = ۱۰$ ، $k_s = ۰/۲۶$ و $k_h = ۱/۰٤$ و $\varepsilon = ۰/۵۵$ (a) $\varphi = ۰$ (b) $\varphi = ۳۰$ (c) $\varphi = ۶۰$ (d) $\varphi = ۹۰$



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



شکل ٦ دمای بی بعد دیواره‌های کانال به‌ازای $Gr^* = ۷/۸۷×۱۰^۵$

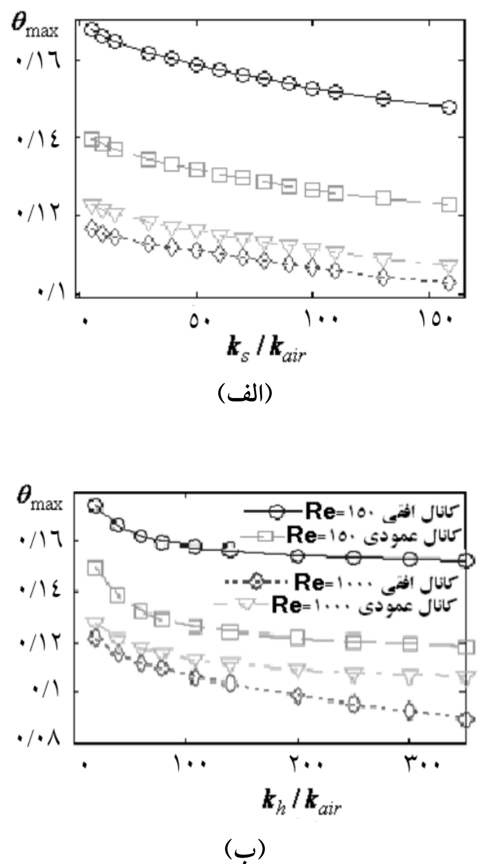


شکل ۷ پروفیل سرعت در انتهای کانال در زوایا و اعداد گراشف مختلف بازای Re = ۱۵۰

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

۴-۳-۱ بررسی اثر ضریب هدایت حرارتی تراشه و برد

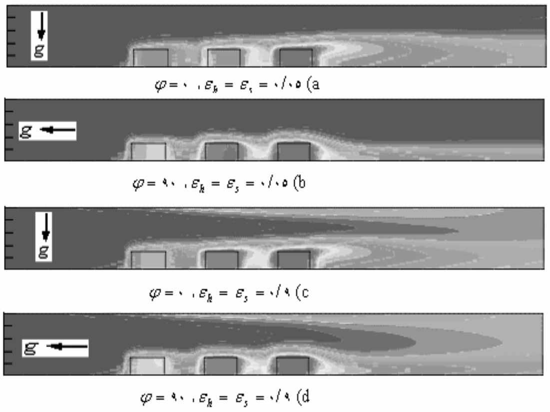
در شکل شماره ۸ دمای ماکزیمم بدون بعد بر حسب ضریب هدایت حرارتی تراشه ها و برد بهازای Re = ۱۵۰ و Re = ۱۰۰۰ و در دو حالت کانال افقی $\varphi = ۰$ و عمودی $\varphi = ۹۰$ ارائه شده است. با افزایش ضریب هدایت حرارتی بی بعد تراشه از ۲۰ به ۳٤٦ دمای ماکزیمم بدون بعد به ازای Re=۱۵۰ و $\varphi = ۰$، ۰/۰۲۲۵ و در $\varphi = ۹۰$، ۰/۰۳۰۷ و بهازای Re=۱۰۰ و $\varphi = ۰$، ۰/۰۳۲۵ و در $\varphi = ۹۰$، ۰/۰۲۱۸ کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش ضریب هدایت حرارتی بی بعد برد از ۵ به ۱۶۰ دمای ماکزیمم بدون بعد بهازای Re = ۱۵۰ و $\varphi = ۰$، ۰/۰۲ و در $\varphi = ۹۰$، ۰/۰۱۵۸ وبه‌ازای Re = ۱۰۰۰ و $\varphi = ۰$، ۰/۰۱۳۵ و در $\varphi = ۹۰$، ۰/۰۱۵۳ کاهش می‌یابد.



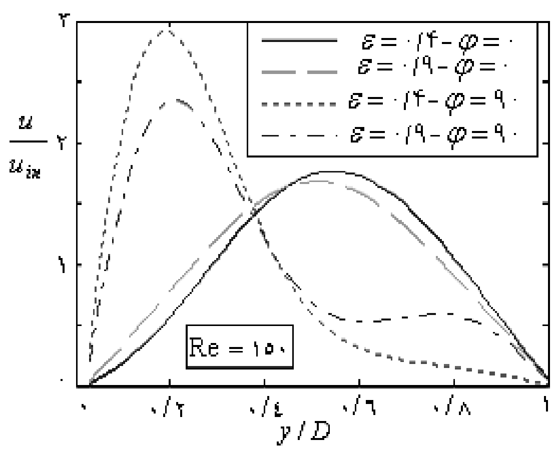
شکل ۸ دمای بیشینه بر حسب ضریب هدایت حرارتی الف) برد ب) تراشه بهازای $Gr^* = ۱/۰۵\times۱۰^{۶}$

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 دما به‌ازای $\varepsilon_h = \varepsilon_s = ۰/۰۵$ و $\varepsilon_h = \varepsilon_s = ۰/۹$ در $Re = ۱۵۰$ و $Gr^* = ۱/۰۵\times۱۰^۶$ و ابعاد پایه نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های ۹(a) و ۹(c) مشاهده می شود که به‌ازای ضریب صدور پایین (۰/۰۵) بعلت کم شدن انتقال حرارت تشعشعی از برد و تراشه‌ها به دیواره مسطح مقابل، دمای آن تغییر نکرده و گرم نمی‌شود. اما به‌ازای $\varepsilon_h = \varepsilon_s = ۰/۹$، 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 $Gr^* = ۱/۰۵\times۱۰^۶$ و ابعاد پایه ترسیم شده است. در یک کانال افقی $\varphi = ۰$، 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 $\varphi = ۹۰$ و $\varepsilon_h = \varepsilon_s = ۰/۴$ به‌علت کم بودن انتقال حرارت تشعشعی، دیواره مسطح به اندازه کافی گرم نیست که باعث راندن سیال به‌سمت 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 ۰/۹، 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.



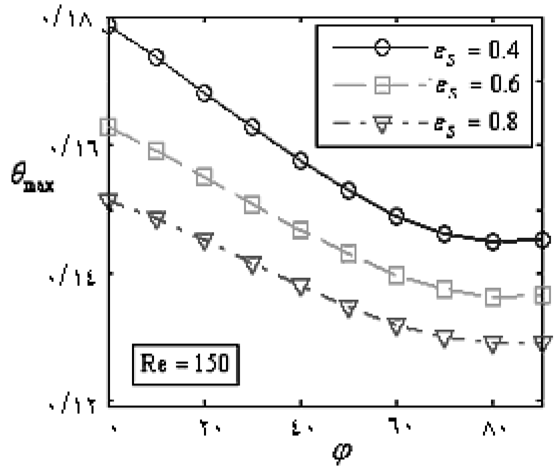
شکل ۹ توزیع دما به‌ازای $\varepsilon_h = \varepsilon_s = ۰/۰۵$ و $\varepsilon_h=\varepsilon_s=۰/۹$ و $Re = ۱۵۰$ و $Gr^* = ۱/۰۵\times۱۰^۶$



شکل ۱۰ پروفیل سرعت در انتهای کانال برحسب ضرایب صدور مختلف به‌ازای $Gr^* = ۱/۰۵\times۱۰^۶$

در شکل ۱۱دمای بیشینه بی بعد بر حسب ضرایب صدور و زوایای نصب مختلف ترسیم شده است. با افزایش ضریب صدور برد و تراشه از ۰/۴به ۰/۸دمای

بیشینه بی بعد به‌ازای $Re = ۱۵۰$ و $\varphi = ۰$، ۰/۰۲۷۳ و در $\varphi = ۹۰$، ۰/۰۱۵۸ و به‌ازای $Re = ۱۰۰۰$ و $\varphi = ۰$، ۰/۰۲۲۶و در $\varphi = ۹۰$، ۰/۰۲۵۲کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱ دمای بیشینه بی بعد بر حسب ضریب صدور و زاویه نصب به‌ازای $Gr^* = ۱/۰۵ \times ۱۰^{۶}$

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 ($Re < ۵۰۰$) با بیشتر شدن زاویه نصب، اثر جابه‌جایی طبیعی بیشتر شده و باعث افزایش سرعت سیال در کنار دیواره‌های داغ و کاهش دمای بیشینه تا $۱۲^{\circ}c$ درجه سانتی‌گراد در $Re = ۱۵۰$ می‌شود. همچنین درعداد کوچک رینولدزهای با افزایش زاویه نصب، طول گردابه‌های بین تراشه‌ها و بعد از آخرین تراشه به‌سرعت کم می‌شود.

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 $۳^{\circ}c$ درجه سانتی‌گراد به‌ازای $Re = ۱۴۰۰$ افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش عدد گراشف به‌ازای اعداد رینولدز کم $Re < ۵۰۰$ دمای بیشینه در کانال افقی تا $۳۰^{\circ}c$ و در کانال عمودی تا $۲۴^{\circ}c$ افزایش پیدا می‌کند. اما در اعداد بالاتر رینولدزهای دمای بیشینه در کانال افقی تا $۲۱/۵^{\circ}c$ و در کانال عمودی تا $۲۲^{\circ}c$ افزایش پیدا می‌کند که نشان می‌دهد عدد گراشف در حالت جابه‌جایی طبیعی اثر بیشتری بر دما دارد.

٤- با افزایش ضریب هدایت حرارتی برد، دمای بیشینه در کانال افقی تا ٪۱٤/۵ و در کانال عمودی تا ٪۱۵/۷ کاهش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن هدایت حرارتی برد در حل عددی است. با افزایش ضریب صدور دیواره‌ها، دمای بیشینه تا ٪۱۷ 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.

٦- 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.

٦- فهرست علائم

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

Gr^*	عدد گراشف اصلاح شده $(g\beta\Delta T_{ref}D^3/\upsilon^2)$
J	شار تابش ورودی (W/m^2)
k	ضریب هدایت حرارتی (W/mk)
L	طول کانال (mm)
L_h	طول تراشه‌ها (mm)
L_c	فاصله تراشه‌ها (mm)
L_1	فاصله اولین تراشه از ورودی کانال (mm)
pr	عدد پرانتل (υ/α)
P	فشار دینامیکی بی بعد $p/\rho u_{in}^2$
q_v	شار حرارتی تولیدی در تراشه‌ها (W/m^3)
q_r	شار حرارتی تابشی (W/m^2)
Re_D	عدد رینولدز $(u_{in}D/\upsilon)$
T	دما (K)
t	ضخامت دیوار کانال (mm)
u	سرعت سیال (m/s)
U	سرعت بی بعد $(\frac{u}{u_{in}})$
v	سرعت سیال (m/s)
V	سرعت بی بعد $(\frac{u}{u_{in}})$
X,Y	مختصات بی بعد $(\frac{y}{D},\frac{x}{D})$
ΔT_{ref}	اختلاف دمای بی $(q_vL_hD_h/k_{air})$
	Greek symb ols
$\phi_{i,j}$	متغیر بی بعد
β	ضریب انبساط هم‌فشار سیال
$\Re$	معیار همگرایی
ε	ضریب صدور سطح
υ	سینماتیک سیال (m/s^2)
σ	ثابت استفتن بولتزمن $(5.6697\times10^{-8}\,w/m^2K^4)$
θ	دمای بی بعد $(\frac{T-T_{in}}{\Delta T_{ref}})$
φ	زاویه نصب کانال نسبت به افق
α	ضریب پخش حرارتی (m^2/s)
	Subscripts
in	ورودی
s	زیرلایه
h	منبع گرمایی
max	مقدار
ref	مقدار مرجع
int	میانی

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

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. Martı´nez-Sua´stegui a, C. Trevin˜o , 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

[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.