

تحلیل عددی تأثیر محرک پلاسما بر میدان جریان و انتقال گرمای همرفت طبیعی در کانال‌های عمودی با دیواره دندانه‌دار

کارشناسی ارشد، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، mdejakam@gmail.com
 استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، namanif@guilan.ac.ir
 دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، رودسر، ایران، hmohaddesd@guilan.ac.ir
 دانش‌آموخته دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، hesam.moayedi@gmail.com

مهسا دژاکام
نیما امانی‌فرد
حامد محدث دیلمی*
حسام مویدی

چکیده

در تحقیق حاضر تأثیر استفاده از محرک پلاسما تخلیه دی‌الکتریک سطحی بر انتقال گرمای همرفت طبیعی در چهار کانال عمودی با دیواره صاف، دندانه‌دار مستطیلی، دندانه‌دار دوزنقه‌ای و دندانه‌دار مثلثی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت بررسی تأثیر استفاده از محرک پلاسما و هندسه کانال، تغییرات عدد ناسلت موضعی، تغییرات نسبت عدد ناسلت میانگین و شاخص ارزیابی عملکرد بر میدان جریان و انتقال گرما مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ، عدد ناسلت متوسط برای تمام کانال‌ها افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه در عدد رایلی 10^5 ، با افزایش ولتاژ از ۶ کیلوولت به ۱۰ کیلوولت، نسبت عدد ناسلت متوسط به ترتیب ۸۹/۱۱، ۹۶/۴۷، ۱۰۲/۵۰ و ۹۶/۶۲ درصد برای کانال‌های عمودی صاف، دندانه مستطیلی، دندانه دوزنقه‌ای و دندانه مثلثی افزایش می‌یابد. همچنین شاخص ارزیابی عملکرد در حضور محرک پلاسما برای تمام کانال‌های عمودی در تمامی شرایط مقداری بزرگ‌تر از ۱/۲۵ دارد که نشان‌دهنده مؤثر بودن اعمال محرک پلاسما بر راندمان گرمایی جریان همرفت طبیعی درون کانال‌های صاف و دندانه‌دار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: محرک پلاسمایی تخلیه دی‌الکتریک سطحی، همرفت طبیعی، تحلیل عددی، کانال عمودی، دیواره دندانه‌دار.

Numerical investigation of effect of plasma actuator on the flow and natural convection heat transfer through the vertical channels with corrugated wall

M. Dejakam

N. Amanifard

H. Mohaddes Deylami

H. Moayedi

University Campus, University of Guilan, Rasht, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Faculty of Technology and Engineering, East of Guilan, University of Guilan, Rudsar, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Abstract

In this study, the effect of DBD plasma actuator on natural convection heat transfer enhancement in four vertical channels with the smooth wall, rectangular corrugation, trapezoidal corrugation and triangular corrugation has been numerically studied. In order to investigate the effect of using a plasma actuator and channel geometry, local Nusselt number, variations of average Nusselt number ratio, and performance evaluation criterion on the flow field and heat transfer are studied. The results show that increasing voltage increases the average Nusselt number for all channels. For example, in Rayleigh number 10^5 , by increasing voltage from 6 kV to 10 kV, the average Nusselt number ratio is 89.11, 96.47, 102.50, and 96.62% for vertical channels with smooth, rectangular corrugation wall, trapezoidal corrugation wall, and triangular corrugation wall, respectively. Also, the performance evaluation criterion in the presence of the DBD plasma actuator for all vertical channels has a value higher than 1.25 in all conditions, which indicates the effectiveness of the DBD plasma on the thermal efficiency of the natural convection heat transfer in smooth and corrugated channels.

Keywords: DBD plasma actuator, Natural convection, Numerical investigation, Vertical channel, Corrugated wall.

غیرفعال طبقه‌بندی کرد. استفاده از باله‌ای جامد و متخلخل [۱]، موانع [۲] و هندسه‌های مختلف کانال‌های عمودی [۳]، نمونه‌هایی از روش‌های غیرفعال می‌باشند.

از سوی دیگر، محرک‌های الکتروهیدرودینامیک^۱ (EHD) [۴-۱۷] با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردشان، به عنوان یک روش فعال، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند. این محرک‌ها کاملاً برقی و بدون قطعات متحرک هستند، به سرعت به کنترل جریان پاسخ می‌دهند، انتقال گرما را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند و

۱- مقدمه

انتقال گرمای همرفت طبیعی و جریان سیال در کانال‌های عمودی به دلیل داشتن طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی مانند عایق‌بندی ساختمان، کنترل گرمایی در تجهیزات الکترونیکی، جمع‌کننده‌های خورشیدی، راکتورهای هسته‌ای و راکتورهای رسوبی بخار شیمیایی، زمینه‌ای برای تحقیقات گسترده در این حوزه را فراهم ساخته است. افزایش انتقال گرما هدف اصلی در اکثر مطالعات همرفت طبیعی است و برای دستیابی به بازده بیشتر، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. روش‌های افزایش انتقال گرما را می‌توان به دو دسته راهکارهای فعال و

¹ Electrohydrodynamic (EHD)

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hmohaddesd@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۱/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۹/۲۷

مصرف برق کمی دارند و همچنین به راحتی روی هر دستگاهی با کمترین تنظیمات مورد نیاز نصب می‌شوند. هنگامی که یک ولتاژ بالا به یک الکتروتود تزریق کننده (سیم) اعمال می‌شود، هوا یونیزه شده و یون‌ها به سمت جمع‌کننده جذب می‌شوند. انتقال یون‌های تزریق شده از الکتروتود تزریق کننده به سمت الکتروتود جمع‌کننده باعث می‌شود یون‌ها در نتیجه برخورد، تکانه خود را به مولکول‌های خنثی منتقل کنند. در نتیجه، جریان عمده‌ای از مولکول‌های هوای یونیزه تولید می‌شود که تحت عنوان باد کرونا شناخته می‌شود. باد کرونا لایه مرزی روی سطح را تحت تأثیر قرار داده و می‌تواند آهنگ انتقال گرما بین سطح و هوای محیط را افزایش دهد. استفاده از روش‌های کنترل جریان فعال می‌تواند کارایی بالاتری را برای یک سیستم کنترل شده ارائه کنند. در ادامه، برخی از مطالعات مرتبط ذکر شده است.

تأثیر میدان الکتریکی بر انتقال گرما همرفت طبیعی از یک چاه گرمایی دارای دو باله واگرای متقارن توسط وانگ و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. نتایج آن‌ها نشان داد که در ارتفاع میانی باله، سرعت باد ناشی از محرک الکتروهیدرودینامیک به صورت خطی با ولتاژ اعمال شده افزایش داشته، اما با فاصله الکتروتود تزریق کننده از الکتروتود جمع‌کننده کاهش می‌یابد. همچنین، آن‌ها بیان کردند که ضریب انتقال گرما در حضور EHD، ۱/۵ تا ۳/۵ برابر همرفت طبیعی است. جانگ و چن [۶] تأثیر جریان ناشی از الکتروهیدرودینامیک بر افزایش انتقال گرما در جریان همرفت طبیعی روی یک صفحه افقی را بررسی کردند. آن‌ها بهینه‌سازی گام الکتروتود و ارتفاع الکتروتود (فاصله طولی و عرضی) را برای افزایش انتقال گرما در هر توان مصرفی به عنوان تابع هدف بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشینه مقدار افزایش انتقال گرما تحت تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیکی، ۱/۵ برابر است. محمودی و همکاران [۸] به طور تجربی و عددی تأثیر باد کرونا بر انتقال گرما همرفت طبیعی در یک استوانه افقی هم‌دم را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این است که تخلیه کرونا در اعداد رایلی پایین، تأثیر قابل توجهی بر عدد ناسلت دارد. بان و همکاران [۹] جریان و انتقال گرما تحت تأثیر جریان القایی EHD در یک محفظه را بصورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که اعمال میدان الکتریکی غیریکنواخت نسبت به میدان یکنواخت تأثیر بیشتری بر بهبود انتقال گرما دارد. گلسفید و همکاران [۱۲] اثر جریان الکتروهیدرودینامیکی بر افزایش انتقال گرما همرفت طبیعی در یک محفظه را به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که در اعداد رایلی بالا، تأثیر گرمای ژول در معادله انرژی قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. همچنین نشان آن‌ها حاکی از آن است که استفاده از الکتروتود صفحه‌ای با پیکربندی مناسب می‌تواند عملکرد EHD را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال گرما همرفتی در حضور میدان الکتریکی، ۳/۶ برابر افزایش می‌یابد. رضایی و همکاران [۱۳] به طور تجربی اثر جریان ناشی از EHD بر انتقال گرما همرفت طبیعی بر سطوح گسترش یافته را بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که اعمال ولتاژ موجب حرکت هوای اطراف به سمت باله‌ها می‌شود. همچنین آن‌ها نشان دادند که با افزایش ولتاژ اعمالی، انتقال گرما از سطح گسترش یافته به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. کاساپاناند [۱۴] به صورت عددی افزایش انتقال گرما همرفت طبیعی در داخل باله‌های عمودی داخل یک

محفظه را توسط EHD بررسی کرد. نتایج نشان داد که الگوی جریان و انتقال گرما به طور قابل توجهی به تعداد و موقعیت الکتروتودها در اطراف باله‌ها بستگی دارد و تعداد بهینه الکتروتودها به هندسه باله‌ها بستگی دارد. همچنین نتایج وی حاکی از آن است که افزایش انتقال گرما در حضور میدان الکتریکی با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش و با افزایش عدد رایلی کاهش می‌یابد. این مطالعه توسط کاساپاناند [۱۵] به کانال‌های باز عمودی برای بررسی اثر جریان القایی EHD بر افزایش انتقال گرما گسترش یافت.

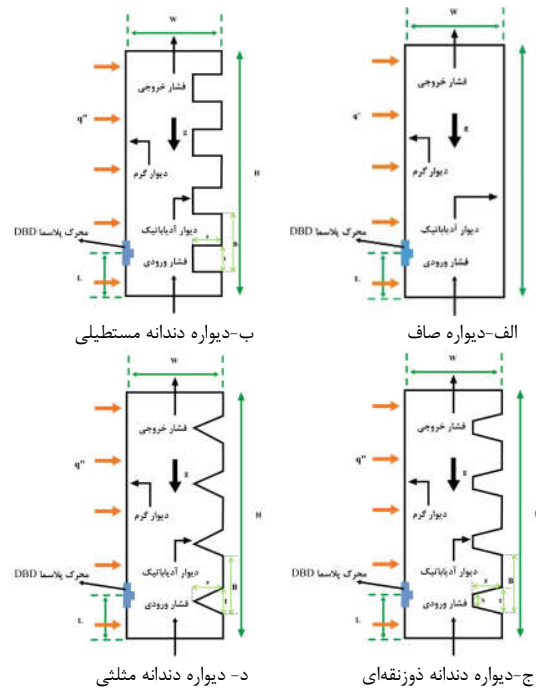
محرک‌های پلاسمای تخلیه دی‌الکتریک سطحی^۱ (DBD) به عنوان یکی دیگر از ابزارهای کنترل جریان فعال، به دلیل ویژگی‌های خاص بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۶-۱۹]. این محرک‌ها کاملاً الکتریکی و فاقد قطعات متحرک مکانیکی می‌باشند، سریع واکنش نشان می‌دهند و برای کنترل‌های فعال وابسته به زمان بسیار منعطف بوده و در دستگاه‌ها با کمترین تغییرات لازم قابل به‌کارگیری می‌باشند [۱۷ و ۱۸]. در محرک‌های پلاسمای تخلیه دی‌الکتریک سطحی، اعمال ولتاژ بالای متناوب روی الکتروتودها باعث می‌شود هوا در مجاورت آن‌ها یونیزه شده و توسط مکانیزم برخورد یونی و تبادل اندازه حرکت بین ذرات باردار و خنثی، یک نیروی حجمی پیشران حاصل آید [۱۹]. مویدی و امانی فرد [۲۰] به صورت عددی به بررسی تأثیر حضور محرک‌های پلاسمای بر افزایش انتقال گرما طبیعی در یک کانال عمودی صاف پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که انتقال گرما در حضور محرک DBD حدود ۲/۷۵ برابر افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که الگوی جریان و افزایش انتقال گرما در یک کانال عمودی صاف به تعداد محرک‌ها و چیدمان آن‌ها وابسته است. همچنین آن‌ها نشان دادند که تعداد چهار عدد محرک پلاسمای از نظر افزایش انتقال گرما و مصرف انرژی می‌تواند یک طراحی بهینه باشد.

اکثر مطالعات گذشته، تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر بر انتقال گرما همرفت طبیعی درون کانال‌های عمودی همچون: عدد رایلی، کانال دندانه‌دار، و استفاده از محرک پلاسمای در کانال‌های صاف را بررسی کرده‌اند و تأثیر همزمان دو روش فعال (اعمال محرک پلاسمای) و غیرفعال (دیواره دندانه‌دار) بر عملکرد هیدرولیکی گرمایی جریان و انتقال گرما همرفت طبیعی درون یک کانال عمودی هنوز مورد توجه قرار نگرفته است. با توجه به عدم بررسی همزمان این پارامترها و تأثیر متقابل محرک پلاسمای و دیواره دندانه‌دار کانال بر یکدیگر و عملکرد گرمایی کانال دندانه‌دار و همچنین عدم بررسی شاخص ارزیابی عملکرد جهت تحلیل الگوی جریان و انتقال گرما در شرایط مختلف، نوآوری مطالعه حاضر بررسی همرفت طبیعی درون یک کانال‌های عمودی صاف و دندانه‌دار و ارزیابی همزمان تأثیر پارامترهای مؤثر بر افزایش انتقال گرما از قبیل عدد رایلی، ولتاژ اعمالی به محرک پلاسمای و همچنین هندسه دندانه‌ها در تغییر الگوی جریان و تأثیر آن بر افزایش آهنگ انتقال گرما می‌باشد. به عبارت دیگر، نوآوری این تحقیق نقش دندانه‌دار کردن دیواره سمت راست به عنوان یک روش غیرفعال کنترل جریان، همراه با اعمال محرک پلاسمای به عنوان یک روش فعال کنترل جریان، بر عملکرد گرمایی کانال‌های عمودی می‌باشد.

¹ Dielectric Barrier Discharge (DBD)

۲- هندسه مسئله

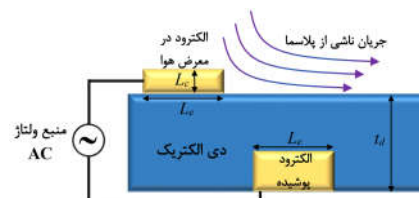
در مطالعه حاضر به بررسی عددی انتقال گرمای همرفت طبیعی تحت تأثیر جریان ناشی از محرک پلازما داخل کانال‌های عمودی پرداخته شده است. چهار هندسه کانال عمودی با دیواره صاف، کانال عمودی با دیواره مستطیلی، کانال عمودی با دیواره مورد مطالعه با دیواره دوزنقه‌ای و کانال عمودی با دیواره مثلثی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هندسه‌های مورد مطالعه دو بعدی بوده و یک محرک پلازما در فاصله معینی بر روی دیواره سمت چپ قرار داده شده است. لازم به ذکر است که موقعیت پلازما براساس موقعیت بهینه مرجع [۲۰] تعیین شده است. طرحواره‌ای از هندسه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه‌های مورد مطالعه کانال با

(الف) دیواره صاف (ب) دیواره دندانه مستطیلی (ج) دیواره دندانه دوزنقه‌ای (د) دیواره دندانه مثلثی

طرحواره‌ای از یک محرک پلازمای تخلیه دی‌الکتریک سطحی در شکل ۲ نشان داده شده است. مشخصات هندسی مربوط به کانال‌ها در جدول ۱ و مشخصات محرک پلازما نیز در جدول ۲ نمایش داده شده است. همچنین خواص سیال هوا به‌عنوان سیال عامل نیز در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- طرحواره یک محرک پلازمای تخلیه دی‌الکتریک سطحی

جدول ۱- مشخصات هندسی کانال‌ها

پارامتر	نماد	مقدار
ارتفاع کانال (cm)	H	۴۰
عرض کانال (cm)	W	۵
ارتفاع نصب DBD (cm)	L	۸
ضخامت دندانه (cm)	t	۵
ارتفاع دندانه (cm)	z	۲
طول دندانه (cm)	s	۲
گام دندانه (cm)	B	۱۰

جدول ۲- مشخصات محرک پلازما

پارامتر	نماد	مقدار
طول الکتروود در معرض هوا (mm)	L_e	۵
ضخامت الکتروود (mm)	L_c	۰٫۰۷۴
ارتفاع دی‌الکتریک (mm)	t_d	۰٫۱۹
ثابت دی‌الکتریک	ϵ_d	۲٫۹
ولتاژ اعمالی (kV)	V_{app}	۱۰-۶
فرکانس (kHz)	f	۶

جدول ۳- خواص سیال هوا

پارامتر (واحد)	مقدار
μ (kg/m.s)	1.789×10^{-4}
C_p (J/kg.K)	۱۰۰۶٫۴۳
K (W/m.K)	۰٫۰۲۴۲

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای حل میدان جریان و انتقال گرما، شامل دو دسته معادلات مرتبط به میدان جریان و انتقال گرما سیال و همچنین معادلات مربوط به مدل‌سازی نیروی حجمی محرک‌های پلازما می‌باشند.

معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال گرما با فرض دو بعدی، تراکم ناپذیر و پایا بودن جریان به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۰]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}((\mu + \mu_t)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})) + \rho g_i \beta (T - T_{in}) \delta_{ij} + F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho e + P)] = \frac{\partial}{\partial x_j}[(K + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}) \frac{\partial T}{\partial x_j}] \quad (3)$$

که در آن e ، P و K به ترتیب انرژی کل، فشار و رسانایی گرمایی سیال می‌باشند. لازم به ذکر است که جریان ثانویه ایجاد شده توسط محرک پلازما به صورت موضعی آشفته است، بنابراین نیاز است که جریان سیال درون کانال عمودی به صورت آشفته مدل‌سازی شود. مطالعات عددی انجام شده بر پدیده جریان ثانویه ناشی از محرک پلازما نیز بر لزوم مدل‌سازی این پدیده به صورت آشفته تأکید کردند [۱۶-۲۰]. همچنین در معادلات (۲) و (۳)، μ_t ویسکوزیته آشفته‌گی می‌باشد که برای محاسبه آن و به منظور مدل‌سازی جریان از

مدل آشفتگی k-ε رینولدز پایین^۱ استفاده شده است [۲۰].

لازم به ذکر است که محرک پلاسما بر اساس مکانیزم تاونسند^۲ عمل می‌کند. در این مکانیزم، فرآیندی از یونیزه شدن گازها رخ می‌دهد، به نحوی که الکترون‌های آزاد توسط یک میدان الکتریکی شتابدار می‌گردند. این الکترون‌های آزاد شتابدار، با مولکول‌های گازی برخورد کرده و در نتیجه الکترون‌های آزاد بیشتری تولید خواهند شد. الکترون‌های جدید نیز به نوبه‌ی خود شتابدار و آن‌ها نیز موجب تولید الکترون‌های آزاد دیگری می‌شوند. نتیجه‌ی این فرآیند، بهمن الکترونی^۳ می‌باشد که در آن یک مجموعه‌ی اولیه از الکترون‌های آزاد، از طریق یونیزاسیون متوالی تکثیر می‌شوند. به بیان ساده، هنگامی که ولتاژ متناوب به الکترونها اعمال می‌شود، تخلیه‌ی پلاسما بر روی سطح دی‌الکتریک بالای الکترودها ظاهر می‌شود که طی هر نیم‌سیکل به هوای اطراف مومنتم تزریق می‌کند. این تزریق مومنتم، بصورت یک نیروی حجمی ماکروسکوپی قابل اندازه‌گیری که از طریق برخوردهای میان ذرات باردار و خنثی به سیال منتقل می‌شود، شناخته می‌شود. عبارت آخر در معادله (۲) نمایانگر نیروهای حجمی ناشی از محرک پلاسما است که در آن تابع توزیع نیروی حجمی پلاسما با یک مدل جبری در راستای x و y مطابق معادله (۴) تخمین زده شده است [۲۱]:

$$\begin{aligned} F_x &= F_{x0} V_{app}^4 \exp\{-[(y-y_0)/x]^2 - \beta_x(x-x_0)^2\} \\ F_y &= F_{y0} V_{app}^4 \exp\{-[(y-y_0-(x-x_0))/x]^2 - \beta_y(x-x_0)^2\} \end{aligned} \quad (4)$$

متغیرهای F_{x0} ، F_{y0} ، β_x و β_y پارامترهای ثابت بوده و به ترتیب دارای مقادیر ۲، ۲، ۶، ۱۰^۷ و 8×10^{-5} می‌باشند. x_0 نقطه میانی بین الکترودهای نصب شده و y_0 در سطح دی‌الکتریک است. همچنین در مطالعه حاضر عدد رایلی بر اساس پهنای کانال (W) طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن "q" شار گرمایی در دیواره چپ (دیواره گرم) می‌باشد [۲۰]:

$$Ra = \frac{g\beta q W^4}{\nu \alpha K} \quad (5)$$

به منظور بررسی تأثیر همزمان اعمال محرک پلاسما و دیواره‌های دندانه‌دار بر آهنگ انتقال گرما، عدد ناسلت از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۰]:

$$Nu = \frac{h_y H}{K} \quad (6)$$

که در رابطه (۶) ارتفاع کانال و h_y ضریب موضعی انتقال گرمای همرفتی است. با جاگذاری ضریب انتقال گرما در معادله (۶)، رابطه عدد ناسلت به شکل زیر ساده می‌شود [۲۰]:

$$Nu_y = \frac{H}{K} \left(\frac{q''}{T_y - T_{in}} \right) \quad (7)$$

که در رابطه فوق "q" شار گرمایی اعمال شده از دیواره گرم به سیال درون کانال است. همچنین، T_y دمای موضعی دیواره گرم و T_{in} دمای سیال ورودی می‌باشد. عدد ناسلت متوسط از انتگرال‌گیری ناسلت موضعی در راستای ارتفاع کانال به صورت زیر محاسبه

می‌شود [۲۰]:

$$Nu_m = \frac{1}{H} \int_0^H Nu_y dy \quad (8)$$

به منظور بررسی تأثیر حضور محرک پلاسما و دیواره‌های دندانه‌دار بر افت فشار در کانال، مقدار افت فشار از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، P_{inlet} و P_{outlet} به ترتیب فشار استاتیکی متوسط در مقاطع ورودی و خروجی هستند.

همچنین به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال گرما و افت فشار ناشی از حضور محرک پلاسما و دیواره‌های دندانه‌دار، شاخص ارزیابی عملکرد^۴ مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\eta = \frac{(Nu_m / Nu_{m0})}{(\Delta P / \Delta P_0)^{1/3}} \quad (10)$$

در این رابطه، Nu_m و ΔP به ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان در کانال دندانه‌دار در حضور محرک پلاسما می‌باشد. همچنین، Nu_{m0} و ΔP_0 نیز به ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان در کانال صاف بدون محرک پلاسما می‌باشد.

۴- شرایط مرزی

برای حل معادلات حاکم، به شرایط مرزی نیاز می‌باشد. با توجه به اعمال نیروی حجمی ناشی از محرک پلاسما به صورت یک عبارت جبری، در تحقیق حاضر نیاز به شرایط مرزی و حل معادلات میدان الکتریکی نمی‌باشد. در نتیجه شرایط مرزی فقط مربوط به میدان جریان و انتقال گرما سیال می‌باشد. دیوار سمت چپ شار گرمایی ثابت و با شرط عدم لغزش می‌باشد. دیواره سمت راست آدیاباتیک و با شرط عدم لغزش است. شرط مرزی ورودی، فشار ورودی و شرط مرزی خروجی، فشار خروجی می‌باشد، همچنین دمای ورودی ۲۹۳ کلوین می‌باشد. شرایط مرزی بصورت خلاصه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- شرایط مرزی

مقدار	مرز
$P_{total} = P_{gauge}$	ورود
$P_{static} = P_{gauge}$	خروج
$q'' = 0$	دیوار سمت راست
$q'' = cte$	دیوار سمت چپ

۵- روش عددی

۵-۱- روند حل عددی

به منظور حل عددی معادلات حاکم، از نرم‌افزار Ansys Fluent ورژن ۱۸، براساس روش حجم محدود استفاده شده است. معادلات حاکم بصورت پایا و توسط حل‌کننده بر پایه فشار^۵ به صورت ضمنی شبیه‌سازی شده‌اند. برای گسسته سازی معادله فشار، تقریب مرتبه دوم

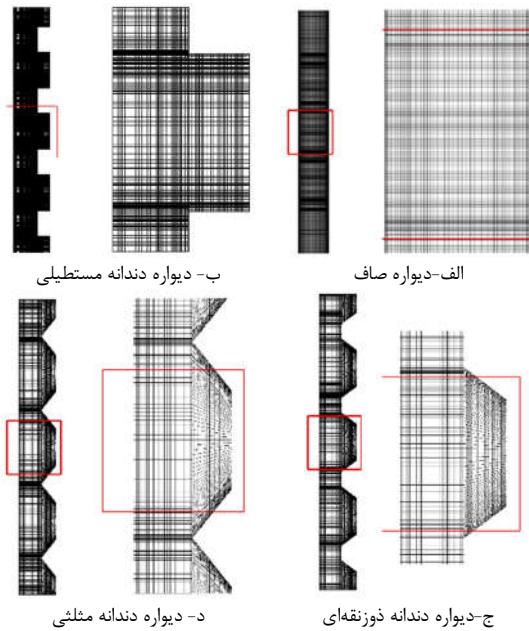
⁴ Performance evaluation criterion

⁵ Pressure Based

¹ Low Reynolds Number k-ε Turbulence Model

² Townsend

³ Electron Avalanche



شکل ۳- شبکه محاسباتی
(الف) دیواره صاف (ب) دیواره دندانه مستطیلی
(ج) دیواره دندانه دوزنقه‌ای (د) دیواره دندانه مثلثی

۳-۵- اعتبارسنجی نتایج

اعتبارسنجی نتایج تحقیق کنونی به دو بخش تقسیم می‌گردد. بخش اول مربوط به اعتبارسنجی نتایج انتقال گرما همرفت طبیعی درون کانال عمودی صاف با نتایج تجربی بیلماز و فریزر [۲۳]، و بخش دوم مربوط به اعتبارسنجی نتایج جریان ناشی از محرک پلازما با نتایج تجربی توماس و همکاران [۲۴] می‌باشد.

در بخش اول، توزیع دمای بی‌بعد حاصل از حل عددی تحقیق حاضر با نتایج تجربی بیلماز و فریزر [۲۳] در شکل ۴ مقایسه شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع و عرض کانال صاف عمودی به ترتیب ۳ و ۰٫۱ متر می‌باشد. دیواره سمت چپ در دمای ۳۷۳٫۱۵ کلوین و دیواره سمت راست دارای شرط مرزی آدیاباتیک می‌باشد. دمای بی‌بعد در مقطع افقی که در مقطع افقی A-A' در ارتفاع $y=2/94$ واقع شده است، مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که نتایج تحلیل عددی کنونی دارای دقت مناسبی برای شبیه‌سازی جریان همرفت طبیعی درون کانال عمودی می‌باشد.

در بخش دوم اعتبارسنجی نتایج، در شکل ۵ نتایج پروفیل سرعت حاصل از مدل‌سازی عددی تحقیق کنونی در فاصله ۳٫۸۱ سانتیمتری جلوتر از لبه محرک پلازما با نتایج تجربی توماس و همکاران [۲۴] مقایسه شده است. لازم به ذکر است که توماس و همکاران [۲۴] تأثیر محرک پلازما بر جریان هوای ساکن روی یک صفحه تخت را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تطابق مطلوبی بین نتایج تحقیق کنونی با نتایج تجربی حاصل شده است.

و برای معادله مومنتم، تقریب بالادست مرتبه دوم^۱ بکار گرفته شده است. برای حل همزمان میدان فشار و سرعت، از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. همچنین در شبیه‌سازی‌های تحقیق کنونی معیار همگرایی^۲ ۱۰^{-۶} تنظیم شده است. برای اضافه نمودن نیروی حجمی به معادلات مومنتم، از کدنویسی توابع تعریف شده توسط کاربر^۳ و زیر بخش تدوین‌شده^۴ که مبتنی بر زبان برنامه‌نویسی C است، استفاده شده است. با توجه به اینکه نیروی حجمی ناشی از محرک پلازما، بصورت یک عبارت جبری است، زمان محاسبات چندانی ندارد و بخش اصلی زمان محاسبات مربوط به حجم معادلات جریان سیال و انتقال گرما می‌باشد. تمامی محاسبات با استفاده از پردازشگر Intel core i7-1.8 GH و حافظه 8 GB به صورت سری انجام شده و زمان محاسبات در هر مرحله حدود ۲ ساعت می‌باشد.

۲-۵- شبکه محاسباتی و استقلال حل عددی از شبکه

برای تولید شبکه محاسباتی در هندسه‌های مورد بررسی از نرم‌افزار Gambit 2.4.6 استفاده شده است. شبکه‌بندی هندسه‌ها به صورت سازمان‌یافته، مستطیلی و غیریکنواخت می‌باشد. به منظور دقت بیشتر حل، از شبکه‌های کوچک‌تر در اطراف محل قرارگیری محرک پلازما و همین‌طور در نزدیکی دیواره‌ها استفاده شده است. دلیل این امر آن است که در اطراف محرک پلازما و در نزدیکی دیواره‌ها گرادیان‌های شدید سرعت رخ می‌دهد. همچنین در پژوهش حاضر، از مدل آشفتگی k-ε رینولدز پایین و روش رفتار دیواره بهبودیافته^۴ برای مدل‌سازی جریان سیال در نزدیکی دیواره، استفاده شده است. لازم به ذکر است که به منظور دستیابی به دقیق‌ترین جواب برای حل این روش، اندازه‌ی اولین سلول محاسباتی در نزدیکی دیواره با توجه به سرعت جریان ناشی از محرک پلازما و عدد رایلی جریان به گونه‌ای انتخاب شده که اندازه‌ی Y^+ در محدوده‌ی کمتر از عدد ۱ باشد. شبکه‌بندی چهار هندسه مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی بررسی شده است. استقلال حل عددی از شبکه برای کانال‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و تعداد سلول‌های محاسباتی مناسب برای چهار هندسه مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- تعداد سلول‌های محاسباتی چهار هندسه

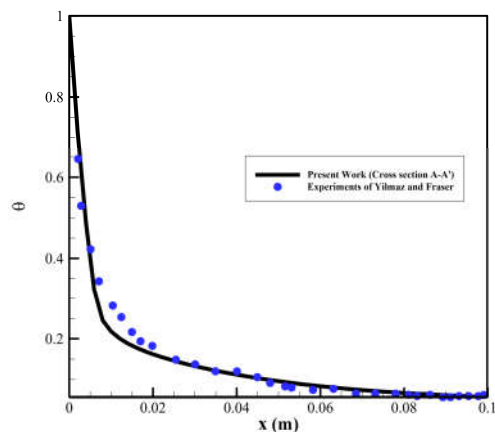
نوع هندسه	تعداد سلول محاسباتی
دیواره صاف	۳۸۲۵۰
دیواره مستطیلی	۴۳۲۰۰
دیواره دوزنقه‌ای	۳۷۸۶۲
دیواره مثلثی	۳۳۳۵۶

¹ Second Order Upwind

² User Defined Function (UDF)

³ Compiled

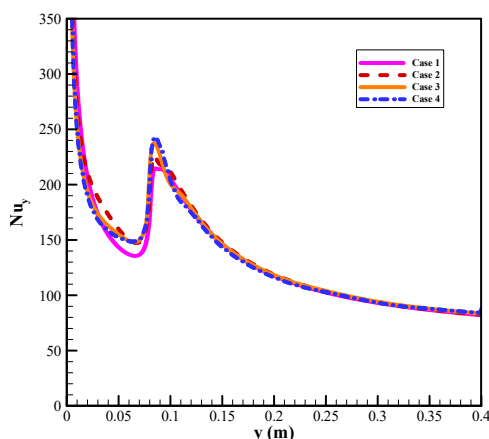
⁴ Enhanced Wall Treatment



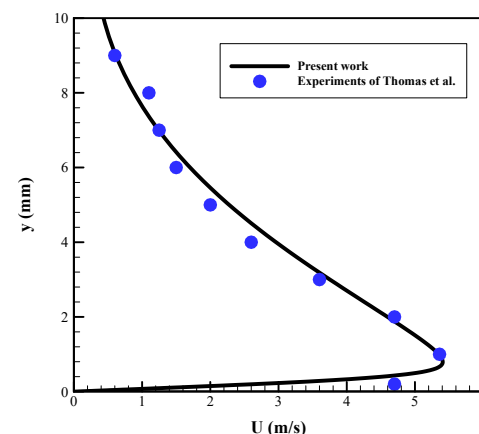
شکل ۴- توزیع دمای بی‌بعد عددی تحقیق حاضر و نتایج تجربی ییلماز و فریزر [۲۳]

محرك پلاسما از دو کانال دیگر بیشتر می‌باشد. همچنین بر اساس این شکل مشخص است که با دور شدن از محرك پلاسما، مقدار عدد ناسلت در هر چهار کانال مورد بررسی کاهش می‌یابد.

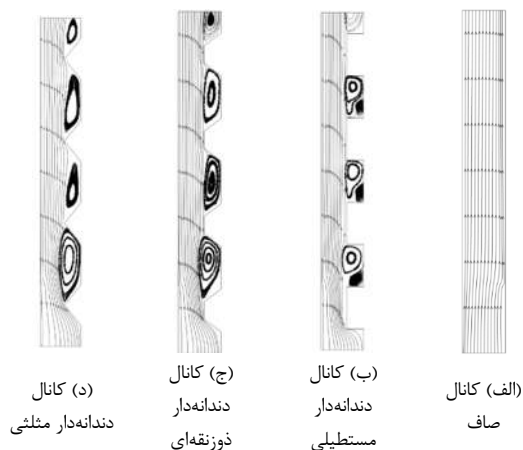
به منظور ارزیابی و تحلیل افزایش انتقال گرما در دو کانال دوزنقه‌ای و مثلثی، خطوط جریان درون کانال‌های عمودی به ازای عدد رایلی 10^7 و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۷، مشاهده می‌شود که وجود دیواره‌های دندانه‌دار درون کانال‌های عمودی موجب ایجاد جریان گردابی در دندانه‌های آن‌ها می‌شود. همچنین مشخص است که شکل گردابه‌های ایجاد شده، در هر هندسه متفاوت می‌باشد. بر اساس نتایج این شکل، می‌توان دریافت این افزایش آهنگ انتقال گرما در دو حالت دوزنقه‌ای و مثلثی به دلیل ایجاد گردابه‌های بزرگ‌تر در میان دندانه‌های آن‌ها و برهم زدن بیشتر لایه مرزی گرمایی در سطح مورد نظر می‌باشد.



شکل ۶- عدد ناسلت در چهار هندسه در عدد رایلی 10^7 و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت



شکل ۵- پروفیل سرعت حاصل از مدل‌سازی عددی تحقیق کنونی در فاصله ۳٫۸۱ سانتیمتری جلوتر از لبه محرك پلاسما و نتایج تجربی توماس و همکاران [۲۴]



شکل ۷- خطوط جریان در عدد رایلی 10^7 و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت (الف) کانال صاف (ب) کانال دندانه‌دار مستطیلی (ج) کانال دندانه‌دار دوزنقه‌ای (د) کانال دندانه‌دار مثلثی

همچنین کانتور دما در کانال‌های مختلف در عدد رایلی 10^7 و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که

۶- نتایج

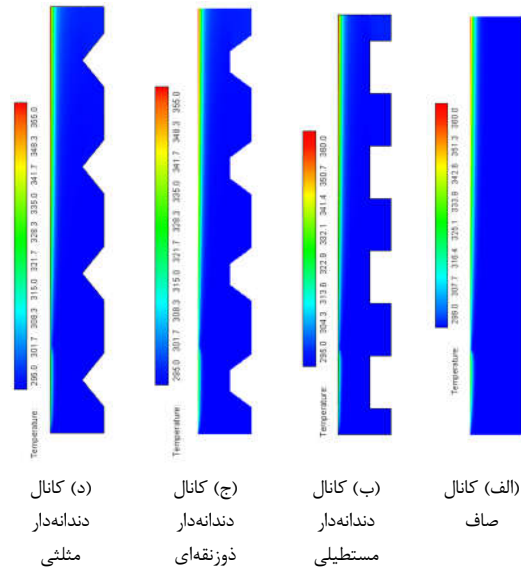
در این تحقیق، تأثیر محرك پلاسما DBD به عنوان یک روش فعال جهت بهبود انتقال گرمای همرفت طبیعی درون کانال‌های صاف و دندانه‌دار بررسی شده است. همچنین تأثیر پارامترهایی همچون عدد رایلی، ولتاژ اعمالی محرك پلاسما و همچنین نوع دیوار دندانه‌دار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور ارزیابی تأثیر این پارامترها، نتایج در قالب خطوط جریان، توزیع دما، عدد ناسلت متوسط و همچنین شاخص ارزیابی عملکرد ارائه شده است.

در این قسمت به بررسی تأثیر اعمال محرك پلاسما در کانال‌های عمودی با هندسه‌های مختلف پرداخته شده است. در شکل ۶ عدد ناسلت موضعی روی دیواره گرم در چهار کانال صاف و دندانه‌دار به ازای رایلی 10^7 و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت با هم مقایسه شده است. هدف از این مقایسه یافتن کانال با هندسه‌ای است که بیشترین آهنگ انتقال گرما را داشته باشد. بر اساس شکل ۶ واضح است که مقدار عدد ناسلت از ورودی تا قبل از محرك پلاسما کاهش یافته است که دلیل فیزیکی آن توسعه‌یافتگی لایه مرزی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشینه مقدار عدد ناسلت در کانال دوزنقه‌ای و مثلثی در محل اعمال

افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با افزایش عدد رایلی جریان همرفت طبیعی، نسبت عدد ناسلت کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش عدد رایلی، نسبت جمله همرفت طبیعی به جریان ناشی از محرک پلاسما افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش رایلی، مقدار تأثیر جریان ناشی محرک پلاسما کاهش می‌یابد و سهم همرفت طبیعی در تعیین رژیم جریان به‌ویژه در نزدیک صفحه گرم افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۹ مشخص است که در تمام ولتاژها، بیشترین میزان افزایش عدد ناسلت متوسط در تمامی اعداد رایلی مربوط به کانال عمودی با دندان مستطیلی می‌باشد. براساس شکل ۹ مشخص است که پس از کانال عمودی با دندان مستطیلی، کانال عمودی با دندان دوزنقه‌ای دارای راندمان گرمایی بهتری نسبت به کانال‌های صاف و دندان مثلثی می‌باشد. از سوی دیگر، واضح است که نسبت عدد ناسلت متوسط در تمام ولتاژها و اعداد رایلی مختلف، برای کانال صاف از سایر کانال‌ها کمتر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان نمود که در کانال‌های دندانه‌دار، علاوه بر محرک پلاسما به عنوان یک روش فعال کنترل جریان، دندانه‌های کانال به عنوان یک روش غیرفعال موجب بهبود انتقال گرما می‌شوند، در حالی که در کانال صاف تنها روش فعال اعمال شده است.

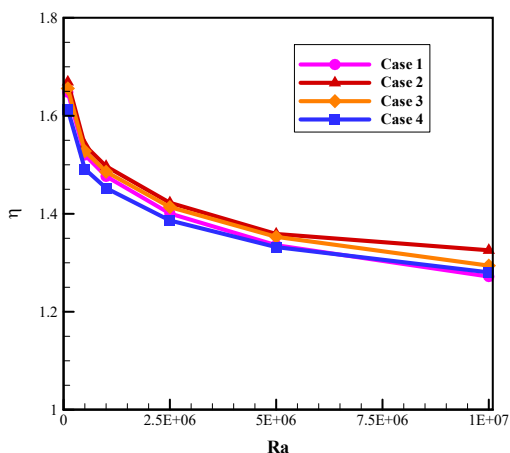
به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال گرما و افت فشار ناشی از وجود دندانه‌ها درون کانال‌های دندانه‌دار و محرک پلاسما، نتایج حاصل از شاخص ارزیابی عملکرد برای کانال‌های مختلف بر حسب عدد رایلی و ولتاژ اعمالی در شکل ۱۰ آمده است. بر اساس نتایج حاصل از این شکل، شاخص ارزیابی عملکرد برای تمام کانال‌ها در حضور محرک پلاسما بزرگ‌تر از ۱٫۲۵ می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت حضور محرک پلاسما بر عملکرد هیدرولیکی و گرمایی درون کانال‌های عمودی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود شاخص ارزیابی عملکرد برای تمامی کانال‌ها، با افزایش ولتاژ اعمالی به محرک پلاسما افزایش یافته است. بر اساس نتایج شکل ۱۰ مشخص است که در ولتاژ ۶ و ۸ کیلوولت کانال با دیواره دندانه مستطیلی دارای شاخص ارزیابی عملکرد بالاتری نسبت به سایر کانال‌ها عمودی می‌باشد، به نحوی که شاخص ارزیابی عملکرد کانال با دیواره دندانه مستطیلی در عدد رایلی ۱۰^۵ و ولتاژ ۸ کیلوولت نسبت به کانال‌های عمودی صاف، دندان دوزنقه‌ای و دندان مثلثی به ترتیب حدود ۶٫۷۱، ۰٫۸۲ و ۵٫۱۲ درصد افزایش یافته است. نتایج نشان‌دهنده این است که با افزایش ولتاژ به ۱۰ کیلوولت، کانال با دندان‌های دوزنقه‌ای دارای شاخص ارزیابی عملکرد بالاتری نسبت به سایر کانال‌ها می‌باشد. بر اساس نتایج مشخص است که اگرچه با دندان‌دار کردن دیواره کانال عمودی، افت فشار افزایش می‌یابد، اما در کانال‌های عمودی دندان‌دار در حضور محرک پلاسما، آهنگ افزایش انتقال گرما دارای رشد بیشتری است که موجب افزایش شاخص ارزیابی عملکرد می‌گردد. همچنین بر اساس شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رایلی، شاخص ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد و دارای روندی مشابه با نسبت عدد ناسلت متوسط می‌باشد.

در این شکل مشخص است، در محل اعمال محرک پلاسما، لایه مرزی گرمایی در هر چهار کانال مختلف دچار بهم‌ریختگی می‌گردد. بر اساس شکل‌های ۶ و ۸ می‌توان مشاهده نمود که با نازک شدن لایه مرزی گرمایی در نزدیکی محرک پلاسما، ضریب انتقال گرما و عدد ناسلت افزایش خواهند یافت. علاوه بر این، مشخص است که بیشینه دما در دو حالت دوزنقه‌ای و مثلثی کمتر از دو حالت دیگر است که این نشان از بهبود انتقال گرما در این دو هندسه دارد.

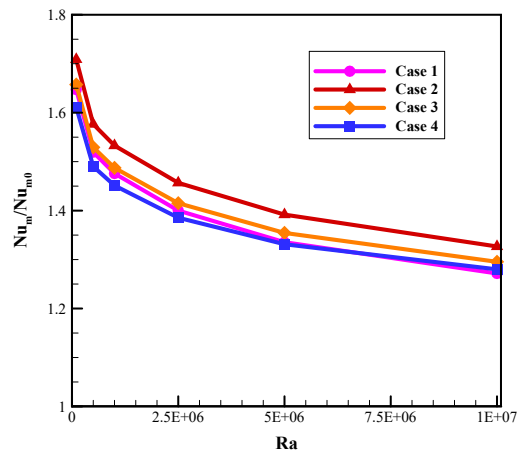


شکل ۸- کانتور دما در چهار هندسه در عدد رایلی ۱۰^۷ و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت (الف) کانال صاف (ب) کانال دندانه‌دار مستطیلی (ج) کانال دندانه‌دار دوزنقه‌ای (د) کانال دندانه‌دار مثلثی

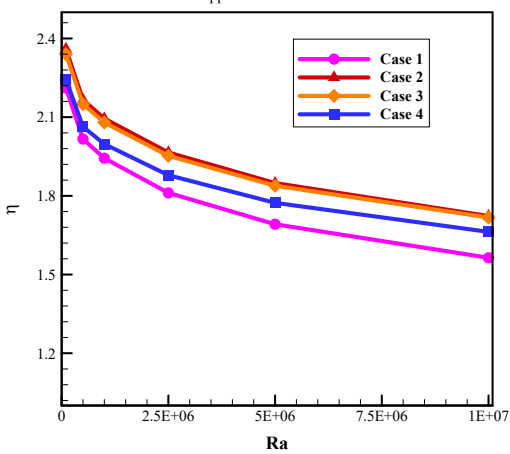
به منظور ارزیابی افزایش انتقال گرما در حضور محرک پلاسما، نسبت عدد ناسلت متوسط در حالت با محرک پلاسما به حالت بدون محرک پلاسما بر حسب عدد رایلی در کانال‌های مختلف به ازای ولتاژهای اعمالی متفاوت در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در تمامی حالت‌ها مقدار نسبت عدد ناسلت متوسط در حضور محرک پلاسما به عدد ناسلت متوسط بدون محرک پلاسما، بزرگ‌تر از ۱ می‌باشد که نشان‌دهنده مؤثر بودن اعمال محرک پلاسما بر افزایش انتقال گرما درون کانال‌های صاف و دندان‌دار می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج مشخص است که با افزایش ولتاژ اعمالی به محرک پلاسما، آهنگ انتقال گرما و عدد ناسلت افزایش چشمگیری می‌یابد. به نحوی که با افزایش ولتاژ از ۶ کیلوولت به ۱۰ کیلوولت، عدد ناسلت متوسط تقریباً برای تمام کانال‌ها حدود ۲ برابر می‌شود. به عنوان نمونه در عدد رایلی ۱۰^۵، با افزایش ولتاژ از ۶ کیلوولت به ۱۰ کیلوولت، نسبت عدد ناسلت متوسط به ترتیب ۸٫۹۱، ۹۶٫۴۷، ۱۰۲٫۵۰ و ۹۶٫۶۲ درصد برای کانال‌های عمودی صاف، دندان‌دار مستطیلی، دندان‌دار دوزنقه‌ای و دندان‌دار مثلثی افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش ولتاژ اعمالی به محرک پلاسما، جریان ناشی از محرک پلاسما تقویت شده و موجب افزایش مومنوموم تزریقی در نزدیک به دیواره گرم می‌گردد. با افزایش مومنوموم در نزدیک دیواره گرم، آهنگ انتقال گرما و عدد ناسلت



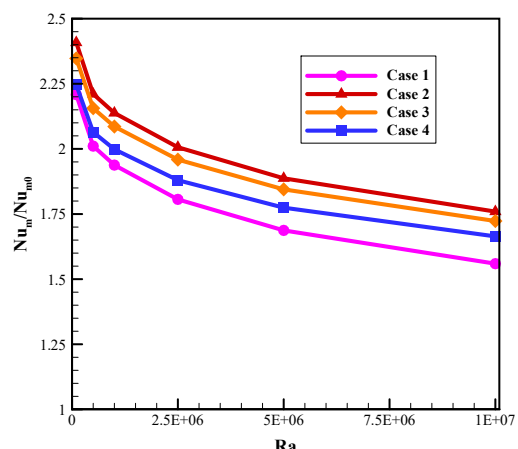
$V_{app} = 6 \text{ kV}$ (الف)



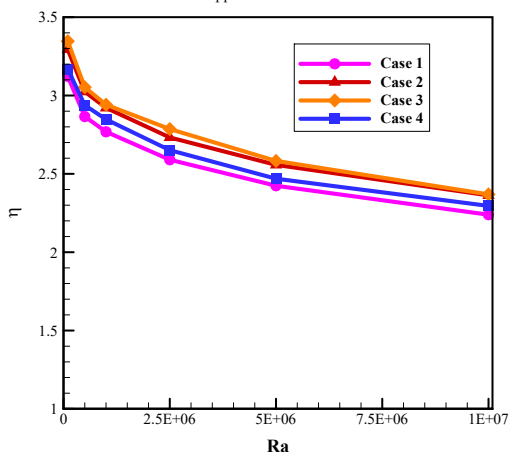
$V_{app} = 6 \text{ kV}$ (الف)



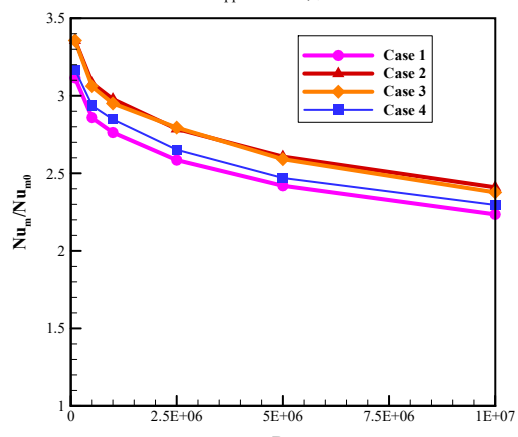
$V_{app} = 8 \text{ kV}$ (ب)



$V_{app} = 8 \text{ kV}$ (ب)



$V_{app} = 10 \text{ kV}$ (ج)



$V_{app} = 10 \text{ kV}$ (ج)

شکل ۱۰- شاخص ارزیابی عملکرد بر حسب عدد رایلی در چهار کانال با هندسه متفاوت

$V_{app} = 10 \text{ kV}$ (ج) $V_{app} = 8 \text{ kV}$ (ب) $V_{app} = 6 \text{ kV}$ (الف)

شکل ۹- نسبت عدد ناسلت متوسط در حالت با پلاسما به حالت بدون پلاسما بر حسب عدد رایلی در چهار کانال با هندسه متفاوت

$V_{app} = 10 \text{ kV}$ (ج) $V_{app} = 8 \text{ kV}$ (ب) $V_{app} = 6 \text{ kV}$ (الف)

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر حضور محرک پلاسما در چهار کانال عمودی با دیواره‌های صاف و دندانه‌دار بر الگوی جریان و انتقال گرما همرفت طبیعی بصورت عددی بررسی گردید. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی

t	ضخامت دندان (m)
T	دما (K)
u	مؤلفه x بردار سرعت (m/s)
U	اندازه سرعت (m/s)
v	مؤلفه y بردار سرعت (m/s)
V _{app}	ولتاژ اعمالی به محرک پلاسما (kV)
W	عرض کانال (m)
x	مختصات بردار x (m)
y	مختصات بردار y (m)
z	ارتفاع دندان (m)
علائم یونانی	
β_x, β_y	پارامترهای ثابت معادله نیروی حجمی
β	ضریب انبساط گرمایی (1/K)
ϵ_d	ثابت دی الکتریک
η	شاخص ارزیابی عملکرد
ρ	چگالی (kg/m ³)
μ	لزجت دینامیکی (Pa.s)
μ_t	لزجت دینامیکی آشفته (Pa.s)
ν	لزجت سینماتیکی (m ² /s)

۹- مراجع

- [۱] نیشاپوری ر. و حسین پور س.، مطالعه تاثیر نصب پره متخلخل درون یک محفظه بسته مربعی جهت افزایش میزان انتقال گرمای جابه‌جایی آزاد. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۸. د. ۴۹. ش. ۱. ص ۳۵۱-۳۵۸.
- [۲] محبی ر. حقیقی س. و شمسی م.، بررسی عددی تأثیر بلوک داغ بر آهنگ انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی داخل یک حفره ۷ شکلی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۸. د. ۴۹. ش. ۲. ص ۳۰۵-۳۱۳.
- [۳] گل محمدپور ع. و پسته‌ای س م.، بررسی اثر پارامترهای هندسی پره‌های طولی خارجی و جریان سیال بر کارایی مبادله‌کن‌های گرمایی عمودی تحت انتقال گرمای جابه‌جایی آزاد. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۸. د. ۴۹. ش. ۱. ص ۲۴۵-۲۵۳.
- [۴] موییدی ح. امانی فرد ن. و محدث دیلمی ح.، تحلیل عددی قدرت جریان ثانویه ناشی از محرک الکتروهیدرودینامیک در یک کانال مسطح. نشریه مهندسی مکانیک/امیرکبیر. ۱۴۰۰. د. ۵۳. ش. ۳. ص ۱۴۰۱-۱۴۱۶.
- [5] Wang J, Fu R, Hu X. Experimental study on EHD heat transfer enhancement with a wire electrode between two divergent fins. Applied Thermal Engineering. 2019 Feb 5;148:457-65.
- [6] Jang JY, Chen CC. 3-D EHD enhanced natural convection over a horizontal plate flow with optimal design of a needle electrode system. Energies. 2018 Jun 27;11(7):1670.
- [7] Samaei L, Deylami HM, Amanifard N, Moayedi H. Numerical evaluation of using micropolar fluid model for EHD-induced natural convection heat transfer through a rectangular enclosure. Journal of Electrostatics. 2019 Sep 1;101:103372.
- [8] Mahmoudi SR, Adamiak K, Castle P, Ashjaee M. The effect of corona discharge on free convection heat transfer from a horizontal cylinder. Experimental Thermal and Fluid Science. 2010 Jul 1;34(5):528-37.
- [9] Yan YY, Zhang HB, Hull JB. Numerical modeling of electrohydrodynamic (EHD) effect on natural convection in an enclosure. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2004 Sep 1;46(5):453-71.

همزمان پارامترهای تأثیرگذار از قبیل ولتاژ اعمالی محرک پلاسما، نوع دندان دیواره‌های کانال و همچنین عدد رایلی بر افزایش انتقال است. همچنین به منظور بررسی همزمان افت فشار و افزایش انتقال گرما، شاخص ارزیابی عملکرد معرفی گردید. به‌طور خلاصه، مهم‌ترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

- نتایج حاکی از آن است که وجود دندان درون کانال عمودی در حضور محرک پلاسما موجب بهبود انتقال گرما می‌شود.
- نتایج نشان می‌دهد که کانال عمودی با دندان مستطیلی نسبت به سایر کانال‌های عمودی در حضور محرک پلاسما، دارای بیشترین مقدار افزایش انتقال گرما می‌باشد.
- با افزایش ولتاژ از ۶ کیلوولت به ۱۰ کیلوولت، عدد ناسلت متوسط برای تمام کانال‌ها افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه در عدد رایلی ۱۰^۵، با افزایش ولتاژ از ۶ کیلوولت به ۱۰ کیلوولت، نسبت عدد ناسلت متوسط به ترتیب ۱۱/۸۹، ۴۷/۹۶، ۵۰/۱۰۲ و ۶۲/۹۶ درصد برای کانال‌های عمودی صاف، دندان مستطیلی، دندان دوزنقه‌ای و دندان مثلثی افزایش می‌یابد.
- شاخص ارزیابی عملکرد در حضور محرک پلاسما برای تمام کانال‌های عمودی در تمامی شرایط مقداری بزرگ‌تر از ۱٫۲۵ دارد که نشان‌دهنده مؤثر بودن اعمال محرک پلاسما بر راندمان گرمایی جریان همرفت طبیعی درون کانال‌های صاف و دندان‌دار می‌باشد.
- با افزایش عدد رایلی جریان همرفت طبیعی در کانال‌های عمودی در حضور محرک پلاسما، نسبت عدد ناسلت و شاخص ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد.

۸- نمادها

B	گام دندان (m)
C _p	گرمای ویژه (J/kg.K)
e	انرژی کل (N/m ³)
f	فرکانس (kHz)
F _x	نیروی حجمی در راستای x (N/m ³)
F _y	نیروی حجمی در راستای y (N/m ³)
F _{y0} , F _{x0}	پارامترهای ثابت نیروی حجمی
g	شتاب گرانش (m/s ²)
H	ارتفاع کانال (m)
k	رسانایی گرمایی (W/m.K)
L	ارتفاع نصب پلاسما دی الکتریک (m)
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (pa)
Pr _t	عدد پرانتل
q"	شار گرمایی (W/m ²)
Ra	عدد رایلی
s	طول دندان (m)

- [10] Moayedi H, Amanifard N. Electrohydrodynamic-enhanced natural convection heat transfer in a vertical corrugated duct. *Heat Transfer Engineering*. 2022 Oct 17;43(21):1838-51.
- [۱۱] فتیحی ع، و آهنگر م، مطالعه عددی جریان جت برخوردی تولید شده توسط رژیم تخلیه الکتریکی کرونا. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۸، د. ۹۷، ش. ۳، ص ۲۵۹-۲۶۷.
- [12] Golsfid SS, Amanifard N, Deylami HM, Dolati F. Numerical and experimental study on EHD heat transfer enhancement with Joule heating effect through a rectangular enclosure. *Applied Thermal Engineering*. 2017 Aug 1;123:689-98.
- [13] Rezaee M, Taheri AA, Jafari M. Experimental study of natural heat transfer enhancement in a rectangular finned surface by EHD method. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020 Dec 1;119:104969.
- [14] Kasayapanand N. Numerical modeling of the effect of number of electrodes on natural convection in an EHD fluid. *Journal of electrostatics*. 2007 Jun 1;65(7):465-74.
- [15] Kasayapanand N. Electrohydrodynamic induced flow and heat transfer in vertical channel with fin array attached. *Heat transfer engineering*. 2010 Feb 1;31(2):127-37.
- [۱۶] کاوس فر س، مهدوی مقدم ح، و اسماعیل زاده ا، شبیه سازی تأثیر محرک پلاسما بر حباب جدایش جریان هوا. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۶، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۲۱۳-۲۲۱.
- [17] Amanifard N, Abdollahzadeh M, Moayedi H, Pascoa JC. An explicit CFD model for the DBD plasma actuators using wall-jet similarity approach. *Journal of Electrostatics*. 2020 Sep 1;107:103497.
- [۱۸] دالوند م، ابراهیمی م، و پوریوسفی غ، بررسی تجربی اثر متغیرهای هندسی و الکتریکی بر عملکرد محرک‌های پلاسمایی DBD در رژیم یکنواخت و رژیم رگ‌های تخلیه‌ی پلاسما. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۶، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۹۵-۱۰۴.
- [19] Moayedi H, Amanifard N, Deylami HM. Parametric study of DBD plasma actuator for heat transfer enhancement in flow over a flat plate at low Reynolds numbers. *Journal of Electrostatics*. 2023 Jul 1;124:103825.
- [20] Moayedi H, Amanifard N. Finding a low cost energy multi-DBD plasma actuator for natural heat transfer enhancement in a vertical duct. *Journal of Electrostatics*. 2020 Nov 1;108:103520.
- [21] Singh KP, Roy S. Force approximation for a plasma actuator operating in atmospheric air. *Journal of Applied Physics*. 2008 Jan 1;103(1).
- [22] Moayedi H, Deylami HM. Electrohydrodynamic performance improvement using different actuation modes in a channel: A CFD simulation study. *Applied Thermal Engineering*. 2022 Jul 5;211:118471.
- [23] Yilmaz T, Fraser SM. Turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007 Jul 1;50(13-14):2612-23.
- [24] Thomas FO, Corke TC, Iqbal M, Kozlov A, Schatzman D. Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control. *AIAA journal*. 2009 Sep;47(9):2169-78.