



بررسی عددی تاثیر تخلیه کرونا بر انتقال حرارت و افت فشار در یک شکاف

نقی حبیبی^۱، نیما امانی فرد^۲، حامد محدث دیلمی^{۳*} و فرید دولتی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

^۲ دانشیار، دانشکده فنی، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

^۳ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، رودسر

^۴ دانشجوی دکترا، دانشکده فنی، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۰/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

چکیده

در مطالعه حاضر، میدان جریان و دما روی یک شکاف تحت تاثیر میدان الکتریکی حاصل از اعمال ولتاژ بالا در شرایط دو بعدی، آشفته، غیرقابل تراکم و پایدار به صورت عددی، مورد تحلیل قرار گرفته است. مدل سازی عددی با نگرش حجم محدود و بر اساس حل معادلات میدان الکتریکی، جریان و انرژی است. در ابتدا پارامترهای میدان الکتریکی حاصل از نتایج عددی حاضر، با نتایج تجربی برای یک صفحه تخت مقایسه شده که از تطابق مناسبی برخوردار است. سپس تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل، ولتاژ اعمالی، عدد رینولدز جریان و مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده بر ضریب انتقال حرارت، توان مصرفی و افت فشار جریان، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، افزایش ضریب انتقال حرارت ابتدا به صورت صعودی بوده، سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ولتاژ اعمالی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. علاوه بر این کاهش فاصله الکتروود تزریق کننده از لبه‌های شکاف، به طور چشم‌گیری بر افزایش انتقال حرارت، توان مصرفی و افت فشار جریان تاثیر گذار است.

کلمات کلیدی: الکتروهایدرودینامیک؛ انتقال حرارت؛ بررسی عددی؛ شکاف.

Numerical Investigation of the Effect of Corona Discharge on the Heat Transfer and Pressure Drop over a Single Slot

N. Habibi¹, N. Amanifard², H. M. Deylami^{3,*}, F. Dolati⁴

¹M.Sc. Student, Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran.

²Assoc. Prof., Dep. Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran.

³Assist. Prof., Mech. Eng., Faculty of Technology and Engineering, East of Guilan, University of Guilan, Rudsar, Iran.

⁴Ph.D. Student, Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

In this study, the flow and temperature fields affected by electric field applied to the fine wire are numerically investigated for the incompressible, turbulent, and steady flow over a single slot. The numerical modeling is based on solving electric, flow, and energy equations with the finite volume approach. The computed results are firstly compared with the experimental data in case of flat plate and the results agree very well. Then, the effect of different parameters such as the applied voltage, Reynolds number, and the emitting electrode position on the heat transfer coefficient and pressure drop is evaluated. The numerical results show that the heat transfer coefficient with the presence of electric field increases by incrementing of the Reynolds number but then decreases. And it also increases by the incrementing of the applied voltage. Moreover, the reduction of distance between the emitting electrode and the slot edges can obviously effect on the heat transfer enhancement, power consumption and pressure drop.

Keywords: Electrohydrodynamic; Heat Transfer; Numerical Investigation; Slot.

۱- مقدمه

انقباض یا انبساط ناگهانی در سطح مقطع کانال‌ها یا به عبارتی دیگر تغییرات ناگهانی در هندسه کانال، باعث ایجاد جدایی جریان و جریان‌های بازگشتی در میدان جریان می‌شود. یکی از معروف‌ترین مدل‌ها به منظور بررسی جریان و انتقال حرارت در مقاطع دارای انبساط و انقباض ناگهانی، مدل شکاف^۱ است. مطالعه جریان و انتقال حرارت روی شکاف به دلیل ایجاد مناطق بازگردشی و تشکیل مناطقی با انرژی کمینه و بیشینه، از اهمیت بالایی در علوم مهندسی برخوردار است. ناحیه بیشینه نرخ انتقال حرارت در نزدیکی جریان برگشتی و وجود نقاطی در گوشه‌های شکاف، سبب ایجاد ناحیه کمینه نرخ انتقال حرارت می‌شود؛ بنابراین برای کاهش و یا از بین بردن این مناطق، از روش‌های مختلفی استفاده می‌کنند که عمدتاً در دو گروه فعال و غیر فعال دسته‌بندی می‌شوند. در روش‌های فعال، اعمال نیروهای خارجی بر سیال، عامل تغییر میدان جریان سیال و افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. یکی از روش‌های فعال جهت کنترل جریان و افزایش انتقال حرارت روی سطح اجسام، استفاده از میدان الکتریکی ایجاد شده توسط یک منبع ولتاژ بالا است.

اگر یک میدان الکتریکی قوی در یک سیال دی الکتریک به وسیله یک الکترود دارای ولتاژ بالا با شعاع انحنا کوچک به عنوان تزریق‌کننده و الکترود دیگر به عنوان جمع‌کننده که در فاصله معینی از یکدیگر قرار دارند ایجاد شود، در فضای بسیار کوچکی اطراف الکترود تزریق‌کننده، گرادیان پتانسیل الکتریکی بیشتر است و مولکول‌های آزاد یونیزه می‌شوند. این منطقه، منطقه یونیزاسیون نام گرفته است که شامل، یون‌های مثبت یا منفی است. منطقه دیگری که در آن یون‌ها به سمت الکترود دیگر حرکت می‌کنند، منطقه جابه‌جایی نام گرفته است که در آن فقط یون‌های همانام الکترود تزریق‌کننده وجود دارند. این یون‌ها به صورت توده‌های تحت تاثیر نیروی کولمب در جهت خطوط میدان الکتریکی به طرف الکترود جمع‌کننده حرکت می‌کنند که به حرکت

توده‌ای این یون‌ها، اصطلاحاً تخلیه کرونا یا باد کرونا می‌گویند.

به‌منظور ایجاد باد کرونا، از هر دو نوع ولتاژ مثبت و منفی می‌توان استفاده کرد. در حالت اعمال ولتاژ مثبت به الکترود تزریق‌کننده، زمانی که ولتاژ افزایش می‌یابد، الکترون‌ها به سمت منطقه میدان قوی حرکت می‌کنند و منطقه‌ای را تشکیل می‌دهند که این منطقه بیشترین منطقه پدیده یونیزاسیون را تشکیل می‌دهد و یون‌های مثبت به سمت الکترود دیگر رانده می‌شوند؛ اما در حالت اعمال ولتاژ منفی با افزایش ولتاژ، یون‌های منفی به سمت الکترود دیگر رانده می‌شوند و یون‌های مثبت در اطراف الکترود تزریق‌کننده تجمع می‌کنند. تخلیه کرونا منفی، بی‌نظمی‌هایی در ایجاد نیروی الکترویهیدرودینامیک ایجاد می‌کند و بر خلاف کرونا مثبت، به طور ناپیوسته در طول الکترود تزریق‌کننده صورت می‌پذیرد؛ همچنین پایداری قطب مثبت نسبت به قطب منفی، بیشتر و مصرف انرژی الکتریکی قطب مثبت نسبت به قطب منفی، کمتر است. علاوه بر این تخلیه کرونا مثبت به‌طور پیوسته در سرتاسر الکترود تزریق‌کننده پخش می‌شود؛ در حالی که کرونا منفی در مکانی از طول سیم که دارای ناهمواری باشد، تمایل به تخلیه دارد. در اثر یونیزاسیون و رانده شدن یون‌ها به سمت الکترود جمع‌کننده حاصل از برقراری اختلاف ولتاژ الکتریکی بین دو الکترود، در ابتدا جریان الکتریکی بسیار ضعیفی شکل می‌گیرد و با افزایش تدریجی ولتاژ اعمالی، جریان الکتریکی هم به تدریج افزایش می‌یابد. با عبور از یک ولتاژ معین و افزایش بیشتر ولتاژ اعمالی، اختلاف پتانسیل ثابت بوده، جریان الکتریکی برقرار شده به شدت افزایش می‌یابد. به این حد ولتاژ، ولتاژ آستانه گفته می‌شود که شروع کرونا نیز، در همین ولتاژ معین رخ می‌دهد.

پدیده الکترویهیدرودینامیک شامل، تقابل میدان‌های جریان، دما و میدان الکتریکی است. در این پدیده با انتقال مومنتم به جریان اولیه سیال و برهم زدن الگوی جریان اصلی، لایه مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ در نتیجه با کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی و همچنین آشفتگی جریان در نواحی دارای شار حرارتی، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. نمایی از بکارگیری محرک الکترویهیدرودینامیک، در شکل ۱ نشان داده شده است.

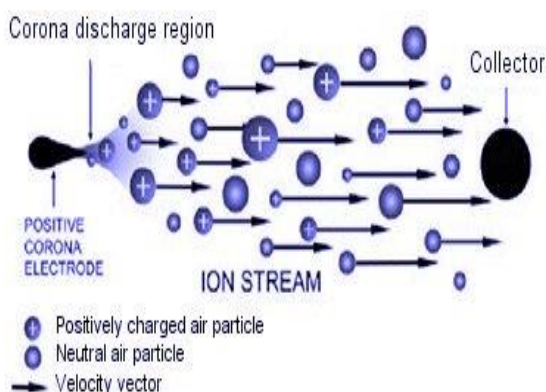
¹ Slot

کیاتسیریرات [۹]، افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری حاصل از اعمال میدان الکتریکی در یک کانال موجی شکل را به صورت عددی بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن یک هندسه مطالعاتی به صورت موج‌دار و استفاده از شبیه‌سازی عددی با تغییر تعداد و فاصله الکترودها ضمن یافتن آرایش بهینه برای افزایش انتقال حرارت به این نتیجه رسیدند که کاهش عدد رینولدز، افزایش تعداد و دامنه نوسان‌های دیواره و افزایش دمای دیواره موجی شکل، عوامل تاثیرگذاری در استفاده از میدان الکتریکی می‌باشند؛ همچنین ضریب بازدارندگی متوسط در آرایش بهینه الکترودها، به علت سرعت بالای جریان در اطراف دیواره موجی شکل، بیشترین مقدار را نسبت به آرایش‌های دیگر دارا است. علم‌قلیلو و اسماعیل‌زاده [۱۰]، مشخصه‌های انتقال حرارت جریان‌های اجباری داخل یک کانال همراه با موانع مستطیلی مستقر در کف آن را در حضور میدان الکتریکی ولتاژ بالا به صورت تجربی بررسی نمودند. آنها با ساخت یک منطقه مطالعاتی و قرار دادن منابع گرمایی داخل موانع، برای افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی از سه روش غیر فعال، فعال و ترکیبی استفاده نمودند. مطالعه آنها نشان داد که روش غیرفعال، در آرایش زیگزاگی سوراخ‌های نزدیک دیواره موانع و اعداد رینولدز بالا موثرتر است. در این حالت، حداکثر افزایش آهنگ انتقال حرارت متوسط و موضعی به ترتیب برابر، ۶۰٪ و ۱۲۶٪ گزارش شد؛ اما تأثیر روش فعال الکتروهیدرودینامیک و روش ترکیبی در اعداد رینولدز پایین ($Re=500$)، بیشتر است؛ همچنین حداکثر افزایش آهنگ انتقال حرارت متوسط و موضعی با استفاده از میدان الکتریکی به ترتیب برابر، ۱۶۳٪ و ۴۰٪ و در روش ترکیبی به ترتیب برابر، ۲۰۶٪ و ۶۷٪ است. دیلمی و همکاران [۱۱]، اثرات پدیده الکتروهیدرودینامیک را در جریان هوا داخل یک کانال شیاردار به صورت عددی بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن آرایش‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی، به بررسی ضریب انتقال حرارت، افت فشار و ضریب بهبود عملکرد حرارتی پرداختند. آنها دریافتند که با شیاردار کردن کانال، ضریب انتقال حرارت و میزان افت فشار افزایش می‌یابد؛ همچنین در حضور میدان الکتریکی، میزان افزایش انتقال حرارت و افت فشار به طور محسوس افزایش می‌یابد. علاوه بر این میزان تاثیرگذاری میدان الکتریکی بر جریان

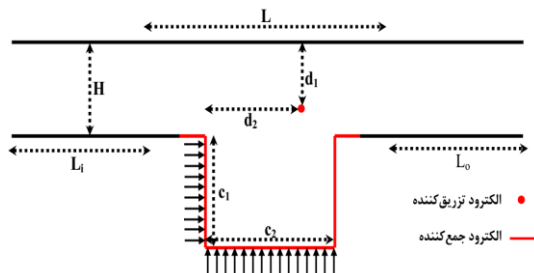
الکتروهیدرودینامیک^۱، پدیده‌ای است که در چند دهه گذشته مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. پژوهش‌های انجام شده، حاکی از ظرفیت بالای این روش در بهینه‌سازی سیستم‌های حرارتی مختلف است. به عنوان مثال، از این پدیده جهت ایجاد شتاب و حرکت در سیال ساکن بهره برده می‌شود [۱]؛ همچنین در صنعت هوافضا، محرک‌های الکتروهیدرودینامیک جهت کاهش نیروی بازدارندگی هواپیما و یا پایداری جریان هوا به کار گرفته می‌شوند [۲،۳]. علاوه بر این در صنعت غذایی، جریان کرونا به عنوان روشی نوین به منظور بهبود فرآیند خشک کردن مواد متخلخل مطرح شده است [۴،۵]. نیاز روزافزون به سیستم‌های حرارتی کوچک‌تر و با صرفه‌تر در صنایع مختلف مانند، صنایع غذایی، تهیه مطبوع و انرژی‌های نو، بهبود انتقال حرارت را امری ضروری ساخته، از این رو محققان و طراحان تلاش زیادی را صرف آن کرده‌اند. بهبود انتقال حرارت حاصل از تقابل میدان‌های الکتریکی، دما و جریان هوای آرام عبوری از دسته لوله توسط کاساپاناند و همکاران [۶]، مطالعه شده است. نتایج مطالعه آنها حاکی از آن است که بهبود ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز و فاصله بین الکترودها و سطح لوله‌ها، رابطه معکوسی داشته، به آرایش و تعداد الکترودها و تعداد ردیف لوله‌ها وابسته است. احمدو و هاوت [۷]، انتقال حرارت در کانال تحت تأثیر میدان الکتریکی را بررسی نمودند که نتیجه این تحقیق، حاکی از آن است که در اعداد رینولدز پایین، تأثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بیشتر است و در حالتی که تعداد الکترودها افزایش می‌یابد، فاصله الکترودها نیز به منظور افزایش انتقال حرارت، دارای اهمیت می‌شود. لاکه و ملکی [۸]، پیکربندی متشکل از الکترودهای سیمی قرار گرفته در خارج از مرکز یک لوله را مورد مطالعه قرار داده‌اند که منجر به ایجاد یک جت موضعی در جهت خروج از مرکز الکترودها شده است. نتایج آنها حاکی از این بود که افزایش پتانسیل الکتریکی، منجر به تشکیل جت‌های کرونای قوی‌تری می‌شود که نتیجه این عمل، افزایش نسبی انتقال حرارت از $4/2-8/7$ برابر نسبت به جابه‌جایی طبیعی به ازای پتانسیل‌های الکتریکی $7/5-10/5$ kV در نقطه برخورد جت کرونا است. کاساپاناند و

¹ Electrohydrodynamic

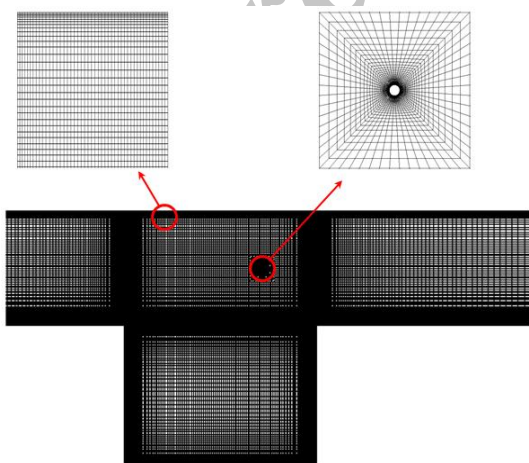
دمایی وجود دارد، تراکم شبکه‌بندی نسبت به دیگر نقاط بیشتر است؛ همچنین ناحیه محاسباتی به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی شده است تا کنترل بهتری روی شبکه تولیدی صورت گیرد.



شکل ۱- نمایی از محرک الکترو هیدرودینامیک [۱]



شکل ۲- هندسه منطقه مطالعاتی



شکل ۳- شبکه محاسباتی

سیال در اعداد رینولدز پایین و ولتاژ اعمالی بالا، بیشتر است و بیشترین ضریب بهبود عملکرد حرارتی در حضور میدان الکتریکی در آرایش مستطیلی نسبت به دیگر آرایش‌ها حاصل شده است. یزدانی و سید یعقوبی [۱۲]، به صورت عددی به مطالعه افزایش انتقال حرارت به وسیله پمپ هدایت الکترو هیدرودینامیکی روی یک پله پسرو پرداختند. آنها با استفاده از دو الکتروود صفحه‌ای و پمپ سیال روی یک پله پسرو در ناحیه انبساطی، دریافتند که می‌توان با استفاده از پدیده الکترو هیدرودینامیک، حجم ناحیه بازگردشی ایجاد شده را کاهش داد. همچنین نشان دادند که استفاده از پدیده الکترو هیدرودینامیک، به منظور افزایش انتقال حرارت در اعداد رینولدز پایین‌تر موثرتر است.

در تحقیق حاضر، ابتدا به بررسی تاثیر عدد رینولدز و ولتاژهای اعمالی مختلف بر میدان جریان و ضریب انتقال حرارت در جریان عبوری از روی یک شکاف که در یک کانال تعبیه شده، پرداخته و سپس تاثیر مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده بر ضریب انتقال حرارت، توان مصرفی و افت فشار جریان، مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- هندسه مسئله و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

نمایی شماتیک از هندسه دو بعدی و دامنه محاسباتی مدل مورد نظر، در شکل ۲ نمایش داده شده است. طول ناحیه فیزیکی که با L نشان داده شده است، برابر ۴۰ سانتی‌متر است. ناحیه محاسباتی از ورودی جریان و از خروجی جریان به ترتیب، ۱۰ و ۲۰ برابر ارتفاع کانال امتداد یافته که فاصله مناسبی است تا شبیه‌سازی عددی جریان تحت تاثیر مرزهای ورودی و خروجی قرار نگیرد. همچنین ارتفاع ورودی کانال ۴ سانتی‌متر و شعاع الکتروود تزریق کننده، ۰/۲ میلی‌متر است. ناحیه c_1 به طول ۵ سانتی‌متر و ناحیه c_2 به طول ۷ سانتی‌متر تحت شار حرارتی یکنواخت در نظر گرفته شده است. مقدار a و b نیز، به عنوان متغیری جهت تعیین مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده است.

طراحی مدل هندسی و تولید شبکه به کمک نرم افزار گمبیت نسخه ۲.۴.۶ انجام گرفته و شبکه ایجاد شده به صورت سازمان یافته، غیریکنواخت و چهارضلعی است. مطابق شکل ۳ به منظور افزایش دقت محاسبات، در مکان‌های نزدیک دیواره و یا مکان‌هایی که گرادیان شدید الکتریکی یا

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (-\beta \rho_c \nabla V) = 0 \quad (5)$$

به این ترتیب معادلات (۲) و (۵) معادلات اساسی حاکم بر میدان الکتریکی می‌باشند که به منظور تعیین نیروی کولمب برای هر سلول به طور همزمان حل می‌شوند. برای حل همزمان این معادلات مشتقات پاره‌ای جزئی و تعیین پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی از تابع تعریف شده توسط کاربر نرم‌افزار فلوئنت که بر پایه برنامه به زبان C می‌باشد، استفاده شده است.

مدل عددی با استفاده از بسته نرم‌افزاری فلوئنت شبیه‌سازی شده است و معادلات بنیادی با استفاده از کد استاندارد این برنامه در یک میدان دوبعدی تراکم‌ناپذیر و آشفتنه حل شده‌اند. با توجه به اینکه فیزیک جریان در پدیده الکتروهایدرودینامیک یک فیزیک آشفتنه است، بنابراین برای شبیه‌سازی جریان سیال در کانال، علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی باید یک مدل آشفتگی مناسب نیز برای تحلیل اثر آشفتگی به کار گرفته شود. جهت شبیه‌سازی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای k-ε استاندارد بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس به کار رفته و لذا دستگاه معادلات پیوستگی، مومنتم و معادلات انتقال k و ε با در نظر گرفتن نیروی حجمی حاصل از اعمال میدان الکتریکی مطابق معادلات (۶)، (۷)، (۸) و (۹) است [۱۱]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (6)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + (\mu + \mu_t)\nabla^2 u - \rho\beta g(T - T_0) + f_e \quad (7)$$

$$\mu_t / \rho = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (8)$$

$$u \cdot \nabla T = \nabla \cdot ((\alpha + \alpha_t)\nabla T) \quad (9)$$

حل عددی معادلات (۶) تا (۹) توسط حل‌کننده بر پایه فشار صورت گرفته و جهت گسسته‌سازی ترم فشار و سایر ترم‌های معادلات به ترتیب، روش استاندارد و تقریب مرتبه دوم و همچنین برای حل توأم میدان فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل استفاده شده است که معادلات میدان الکتریکی به صورت ناپایا و معادلات سیال به صورت پایا حل شده‌اند. به منظور تشخیص همگرایی حل، معیار کاهش باقیمانده‌های تراز شده 10^{-8} است.

به منظور بررسی عدم وابستگی حل عددی به شبکه ایجاد شده، ضریب انتقال حرارت موضعی دیواره سمت چپ شکاف در حضور میدان الکتریکی برای شبکه‌های مختلف مورد

۳- روش حل عددی

نیروی حجمی اعمال شده توسط میدان الکتریکی بر میدان جریان سیال به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۱]:

$$f_e = \rho_c \bar{E} - \frac{1}{2} \bar{E}^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[\bar{E}^2 \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T \right] \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱) \bar{E} ، ρ_c ، ε و ρ به ترتیب، بردار میدان الکتریکی، چگالی بار الکتریکی، ضریب گذردهی الکتریکی و چگالی سیال می‌باشند. مولفه‌های این نیرو به ترتیب از چپ به راست، نیروی کولمب، نیروی دی الکتروفوریتیک و نیروی الکترواستریکتیو نامیده می‌شوند. از مولفه‌های دوم و سوم نیروی حجمی پدیده الکتروهایدرودینامیک به دلیل ثابت بودن ضریب گذردهی الکتریکی و عدم تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی با چگالی برای سیال تراکم‌ناپذیر هوا صرف‌نظر می‌شود؛ بنابراین تنها مولفه موثر در این پدیده، مولفه نیروی کولمب است. این نیروی حجمی از حل همزمان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی تعیین می‌شود.

معادلات پواسون و بقای جریان الکتریکی، به عنوان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی، به صورت روابط (۲) و (۳) تعریف می‌شوند [۱۱]:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\varepsilon} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (J) = 0 \quad (3)$$

که در این رابطه، J چگالی جریان الکتریکی به صورت رابطه (۴) است:

$$J = \rho_c \beta \bar{E} + \rho_c \bar{u} + \sigma \bar{E} - D_e \nabla \rho_c \quad (4)$$

در این رابطه β ، σ و D_e به ترتیب، یون‌پذیری هوا، ضریب قابلیت الکتریکی و ضریب پخش بار الکتریکی می‌باشند. چهار عبارت سمت راست معادله (۴) به ترتیب، تحرک یونی، جابه‌جایی، هدایت الکتریکی و پخش بار الکتریکی نامیده می‌شوند. به دلیل اینکه بزرگی تحرک یونی در پدیده الکتروهایدرودینامیک نسبت به جابه‌جایی، هدایت الکتریکی و پخش بار الکتریکی از مرتبه بالاتری برخوردار است، از عبارات‌های جابه‌جایی، هدایت الکتریکی و پخش بار الکتریکی صرف‌نظر می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه بین پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی ($\bar{E} = -\nabla V$) و همچنین جاگذاری معادله (۴) در معادله (۳)، معادله (۵) به صورت زیر حاصل می‌شود:

جدول ۱- شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی

چگالی بار الکتریکی	مرز
$\partial \rho_c / \partial x = 0$	ورودی جریان
$\partial \rho_c / \partial x = 0$	خروجی جریان
قانون پیک	الکتروود تزریق‌کننده
$\partial \rho_c / \partial n = 0$	صفحه متصل به زمین
$\partial \rho_c / \partial y = 0$	صفحه بالا

از آنجایی که شرایط مرزی برای یک مسئله، با توجه به شرایط فیزیکی مطرح می‌شوند و تعداد شرایط مرزی نیز وابسته به نوع معادلات است، بنابراین تعیین شرایط مرزی برای بار الکتریکی بر روی الکتروود تزریق‌کننده با سعی و خطا قابل محاسبه است. بر این اساس از فرضیه کاپتروف و قانون پیک به منظور تعیین بار الکتریکی استفاده شده است. فرضیه کاپتروف بیان می‌دارد که بعد از آستانه تخلیه کرونا، میدان الکتریکی با افزایش ولتاژ ثابت می‌ماند و مقدار میدان الکتریکی از رابطه تجربی مطابق رابطه (۱۰) قابل محاسبه است [۱۳]:

$$E_0 = 3.1 \times 10^6 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r}}\right) \quad (10)$$

در این رابطه r شعاع الکتروود تزریق‌کننده بر حسب سانتی‌متر می‌باشد.

قانون پیک در تحلیل عددی به طور غیرمستقیم در یافتن مقدار بار الکتریکی قابل استفاده است. در این روش بار الکتریکی بر روی الکتروود تزریق‌کننده حدس زده می‌شود و سپس اندازه میدان الکتریکی روی الکتروود تزریق‌کننده محاسبه می‌شود که در صورت تفاوت اندازه میدان الکتریکی محاسبه شده در تحلیل عددی با مقدار پیک، حدس دیگری برای بار الکتریکی انتخاب می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که اندازه میدان الکتریکی محاسبه شده با مقدار بدست آمده از رابطه پیک تفاوت ناچیزی داشته باشد [۱۳].

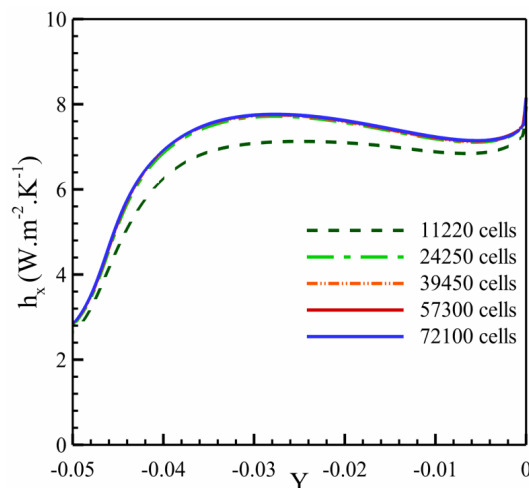
۵- نتایج

در مطالعه حاضر، جهت حصول اطمینان از صحت نتایج، نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی اوسالا و زبوج [۱۴] مقایسه شده است. هندسه مورد مطالعه آنها به صورت شماتیک در شکل ۵ (شکل الف) نشان داده شده است. در

بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، ضریب انتقال حرارت موضعی دیواره سمت چپ شکاف در شبکه‌هایی با تعداد سلول‌های ۵۷۳۰۰ و ۷۲۱۰۰ تقریباً یکسان می‌باشد. بنابراین برای کاهش تعداد محاسبات در تحلیل عددی از شبکه با تعداد سلول ۵۷۳۰۰ استفاده شده است. همچنین برای دیگر شرایط نیز استقلال شبکه بررسی شده است.

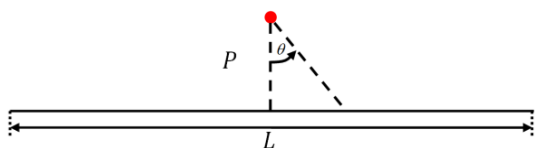
۴- سیستم خواص ترموفیزیکی و شرایط مرزی

هوا به عنوان سیال عامل و به صورت تراکم‌ناپذیر با خواص ترموفیزیکی ثابت فرض شده است. جریان در ورودی کانال، با سرعت یکنواخت در نظر گرفته شده است. مرز خروجی دامنه محاسباتی دارای شرط مرزی جریان خروجی^۱ است. همچنین شرط عدم لغزش روی دیواره‌ها و سطح الکتروود تزریق‌کننده در نظر گرفته شده است. پتانسیل الکتریکی در الکتروود تزریق‌کننده برابر مقدار V_0 ، روی الکتروود متصل به زمین مقدار صفر و در دیگر مرزها تغییرات پتانسیل الکتریکی برابر صفر است؛ همچنین شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی نیز در کل دامنه محاسباتی در جدول ۱ نشان داده شده است.

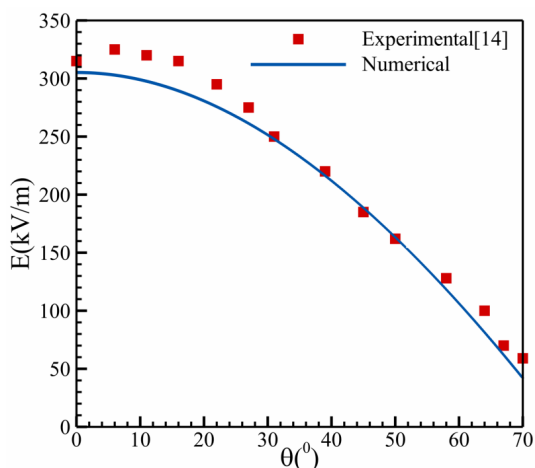
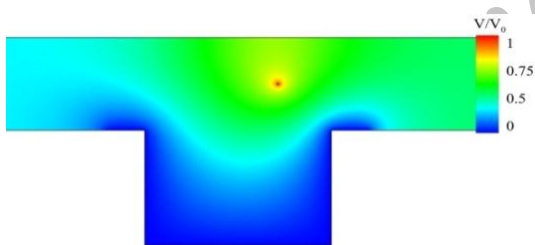
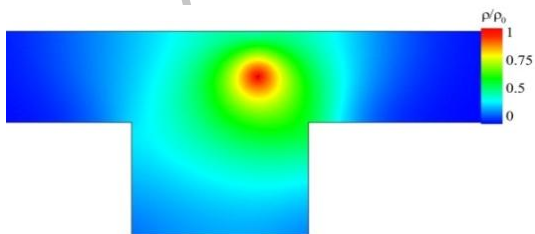


شکل ۴- بررسی استقلال شبکه

^۱ Outflow



شکل ۵- نمایی از هندسه مطالعاتی اوسالا و زوج [۱۴]

شکل ۶- مقایسه توزیع میدان الکتریکی حاصل از تحلیل عددی و نتایج تجربی ($V_0=18kV$)شکل ۷- توزیع بی‌بعد پتانسیل الکتریکی ($d_1=2cm$ و $d_2=5cm$)شکل ۸- توزیع بی‌بعد چگالی بار الکتریکی ($d_1=2cm$ و $d_2=5cm$)

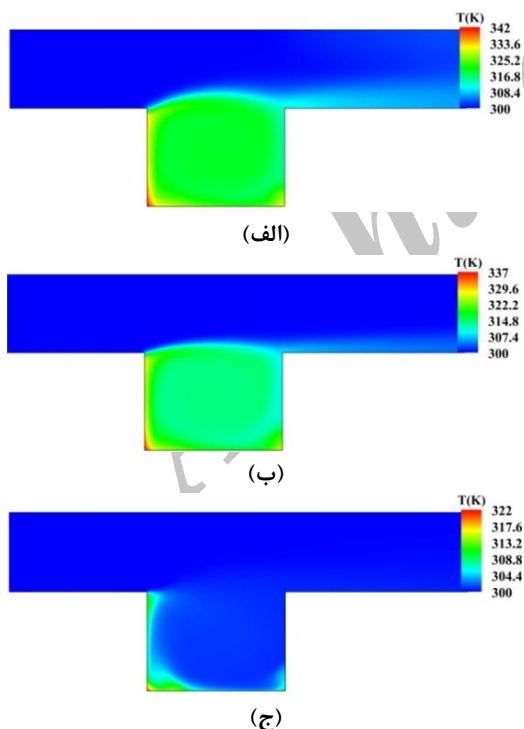
تحقیق آنها طول صفحه ۶۰ سانتی‌متر، شعاع الکتروود تزریق‌کننده ۰/۲ میلی‌متر و فاصله الکتروود تزریق‌کننده تا الکتروود جمع‌کننده ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین θ زاویه بین خط عمود بر صفحه پایینی و خط واصل بین الکتروود تزریق‌کننده به مکانی از الکتروود جمع‌کننده می‌باشد. آنها به صورت تجربی، با اعمال ولتاژی برابر ۱۸ kV به الکتروود تزریق‌کننده، جریان الکتریکی را برقرار کردند؛ همچنین در این تحقیق اختلاف پتانسیل الکتریکی و جریان الکتریکی حاصل در نقاط مختلف صفحه اندازه‌گیری شده و به واسطه آن توزیع میدان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی روی یک صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که میدان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی با افزایش θ کاهش می‌یابد.

به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی حاضر، در شکل ۶ توزیع میدان الکتریکی بر روی صفحه متصل به زمین، با داده‌های تجربی مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر تطابق مطلوبی با داده‌های تجربی دارد.

۵-۱- نتایج تحلیل میدان الکتریکی

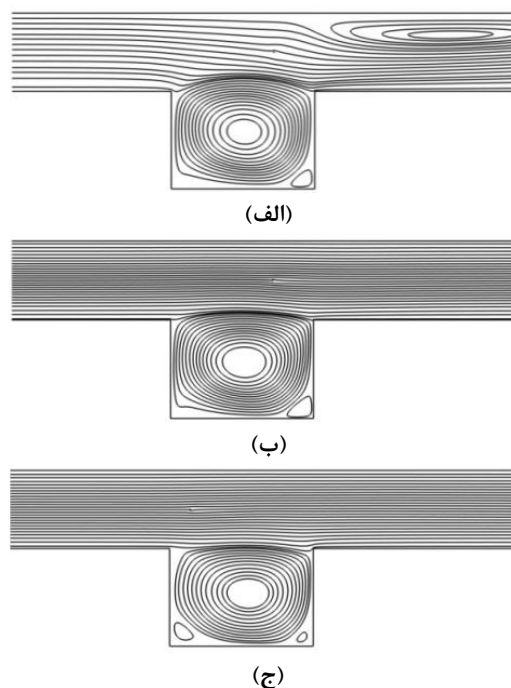
به منظور بررسی میدان الکتریکی حاصل از اعمال ولتاژ بالای الکتریکی به الکتروود تزریق‌کننده، توزیع پتانسیل الکتریکی در شکل ۷ و چگالی بار الکتریکی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، پتانسیل الکتریکی در نزدیکی الکتروود تزریق‌کننده دارای مقدار بیشینه است و با نزدیک شدن به سطح الکتروود جمع‌کننده از مقدار آن کاسته می‌شود. از طرفی دیگر مقدار چگالی بار الکتریکی نیز بر روی الکتروود تزریق‌کننده بیشینه و با فاصله گرفتن از سطح الکتروود تزریق‌کننده، چگالی بار الکتریکی کاهش می‌یابد. بنابراین، نیروی کولمب حاصل از اعمال میدان الکتریکی در مجاورت الکتروود تزریق‌کننده بیشتر است و انتظار می‌رود جریان ثانویه تولیدی در اثر یونیزه شدن سیال دی الکتریک در زیر الکتروود تزریق‌کننده، دارای قدرت بیشتری باشد. در نتیجه مکان قرارگیری الکتروود تزریق‌کننده و ولتاژ اعمالی آن می‌تواند در ایجاد گردابه و افزایش ضریب انتقال حرارت نقش مهمی را ایفا نماید.

مرزی حرارتی کمتر تحت تاثیر جریان ورودی قرار گرفته و به عبارتی قدرت گردابه اصلی در این منطقه ناچیز است. اما با افزایش عدد رینولدز تنش برشی بسیار قوی در روی شکاف ایجاد می‌شود. این تنش برشی باعث می‌شود تا قدرت گردابه تشکیل شده در شکاف افزایش یافته و لایه مرزی حرارتی تحت تاثیر بیشتری از جریان ورودی قرار گیرد. به عبارتی دیگر با افزایش عدد رینولدز جریان ورودی و به تبع آن افزایش حجم ورودی سیال به داخل شکاف و همچنین افزایش قدرت گردابه اصلی، دمای بیشینه صفحات گرم شکاف کاهش می‌یابد. البته در مجموع با توجه به خطوط جریان که در شکل ۹ مشخص است، به دلیل به دام افتادن جریان سیال در شکاف، صفحات گرم کمتر تحت تاثیر سیال خنک ورودی قرار می‌گیرند. علاوه بر این در همه اعداد رینولدز خصوصاً اعداد رینولدز پایین، در دیواره سمت چپ شکاف و در گوشه آن، یک ناحیه با بیشینه دما قابل مشاهده است که ناشی از تله حرارتی به وجود آمده به واسطه گردابه کوچک ایجاد شده در گوشه شکاف است.



شکل ۱۰- توزیع دما بدون حضور میدان الکتریکی ($d_1=2\text{cm}$ و $d_2=5\text{cm}$) (الف) $Re=100$ (ب) $Re=800$ و (ج) $Re=2400$

۵-۲- تاثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان و دما
مطالعه دقیق رفتار جریان بدون حضور میدان الکتریکی این امکان را فراهم می‌کند تا با مقایسه تغییر مشخصه‌های میدان جریان سیال و دما، نقش میدان الکتریکی در افزایش انتقال حرارت مشخص شود. شکل ۹، خطوط جریان عبوری از روی شکاف در حالتی که میدان الکتریکی حضور ندارد را برای سه عدد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، با توجه به تغییر ناگهانی سطح مقطع کانال و در اثر جدایش جریان، گردابه نسبتاً حجیمی سطح شکاف را احاطه کرده است. از طرفی در عدد رینولدز پایین‌تر یک گردابه دیگر نیز در نزدیکی صفحه بالایی به وجود آمده است. البته با افزایش عدد رینولدز به علت مومنتم ورودی بیشتر، جریان تا حدی قابلیت مقابله با اثرات تغییر سطح را داشته و در نتیجه گردابه بالایی به طور کامل از بین رفته است. همچنین در شکل ۱۰ توزیع دما در کانال برای سه عدد رینولدز مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در اعداد رینولدز پایین به دلیل حجم پایین و قدرت کم سیال خنک راه یافته به شکاف، لایه



شکل ۹- خطوط جریان بدون حضور میدان الکتریکی ($d_2=5\text{cm}$ و $d_1=2\text{cm}$) (الف) $Re=100$ (ب) $Re=800$ و (ج) $Re=2400$

مختلف نشان داده شده است همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشخص است، با اعمال میدان الکتریکی و افزایش ولتاژ اعمالی، گستره‌ی بیشتری از درون شکاف از جریان ثانویه تاثیر می‌پذیرد و میزان آشفتگی جریان درون شکاف به خصوص در نواحی نزدیک صفحات دارای گرم افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع افزایش جریان الکتریکی بین الکتروود تزریق‌کننده و الکتروود جمع‌کننده و افزایش قدرت تخلیه کرونا درون شکاف است. در نتیجه انتظار می‌رود با افزایش ولتاژ، انتقال حرارت نیز افزایش یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ به علت تاثیر باد کرونا بر خروجی جریان، در پایین دست جریان نیز میزان آشفتگی افزایش می‌یابد. البته ذکر این نکته ضروری است که آشفتگی حاصل شده از میدان الکتریکی به صورت موضعی است؛ بنابراین می‌توان با تغییر آرایش الکتروود تزریق‌کننده این آشفتگی را کنترل نمود و در مکانی که نیاز به افزایش انتقال حرارت است، آشفتگی را افزایش داد. در جدول ۲ مقدار بیشینه شدت آشفتگی در ولتاژهای مختلف نشان داده شده است.

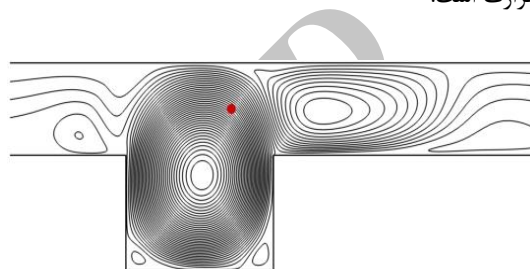
همچنین در شکل ۱۴، توزیع شدت آشفتگی جریان برای اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. در شکل ۱۴ به وضوح مشخص است که با افزایش عدد رینولدز، وسعت مناطقی درون شکاف که بیشینه مقدار آشفتگی را دارند کاهش می‌یابد که این موضوع به واسطه کاهش اثر تخلیه کرونا بر جریان سیال با افزایش عدد رینولدز است. به عبارتی دیگر با افزایش مومنتم جریان ورودی، تاثیر بادکرونا بر جریان سیال ورودی کاهش یافته، در نتیجه از قدرت و وسعت گردابه اصلی کاسته می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که بیشینه شدت آشفتگی با افزایش عدد رینولدز کاهش یافته که البته این کاهش چندان محسوس نیست.

جدول ۲- بیشینه شدت آشفتگی جریان در ولتاژهای

اعمالی مختلف ($d_2=5\text{cm}$ و $d_1=2\text{cm}$, $Re=2400$)

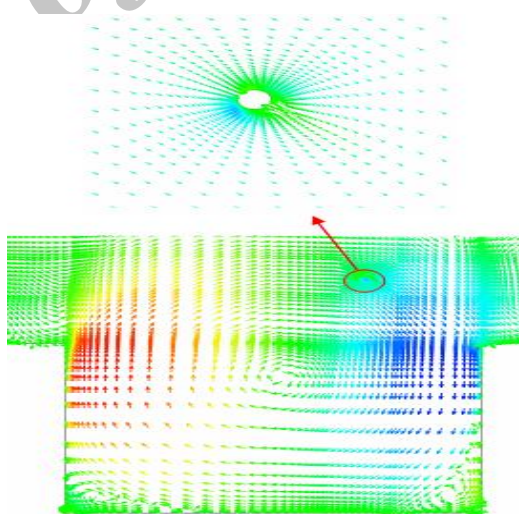
ولتاژ اعمالی (کیلو ولت)	بیشینه شدت آشفتگی (%)
۰	۱۲
۱۶	۱۴
۲۰	۱۹
۲۴	۳۲

برای بررسی تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر میدان جریان، خطوط جریان و بردار سرعت در حضور میدان الکتریکی به ترتیب در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نشان داده شده است. با اعمال میدان الکتریکی، جریان هوای خنک منحرف شده و به سمت صفحات دارای شار حرارتی هدایت می‌شود. این انحراف جریان ورودی باعث ایجاد گردابه‌هایی حجیم در مناطق مختلف کانال و شکاف می‌شود. البته به منظور تعیین تاثیر این پدیده بر انتقال حرارت نیاز به بررسی ضریب انتقال حرارت است.



شکل ۱۱- خطوط جریان در حضور میدان الکتریکی

($d_2=5\text{cm}$ و $d_1=2\text{cm}$, $Re=2400$, $V_0=20\text{kV}$)

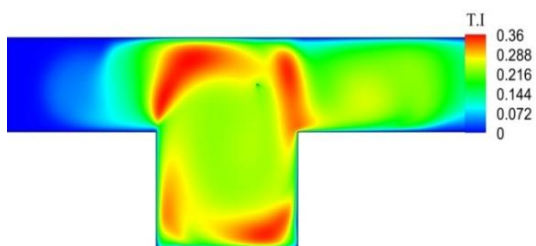


شکل ۱۲- بردار سرعت در حضور میدان الکتریکی

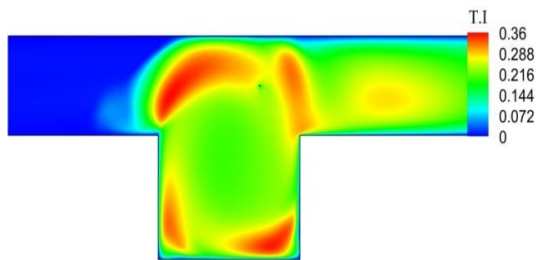
($d_2=5\text{cm}$ و $d_1=2\text{cm}$, $Re=2400$, $V_0=20\text{kV}$)

۳-۵- تاثیر ولتاژ اعمالی و عدد رینولدز جریان بر شدت آشفتگی

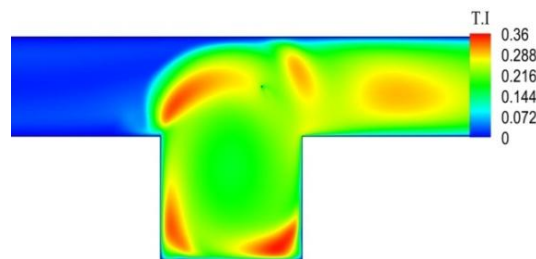
در شکل ۱۳ توزیع شدت آشفتگی جریان بدون حضور میدان الکتریکی و در حضور میدان الکتریکی در ولتاژهای اعمالی



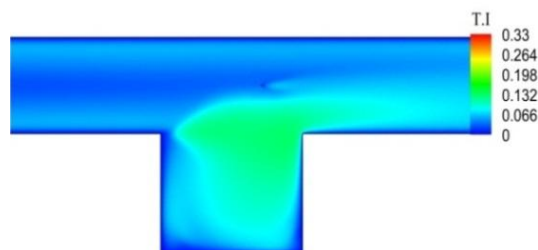
(الف)



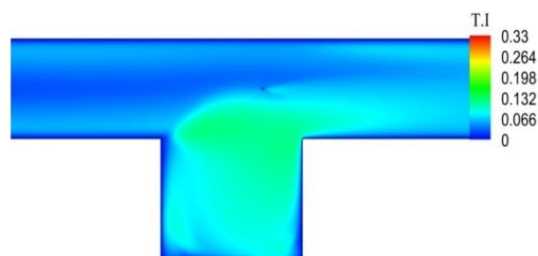
(ب)



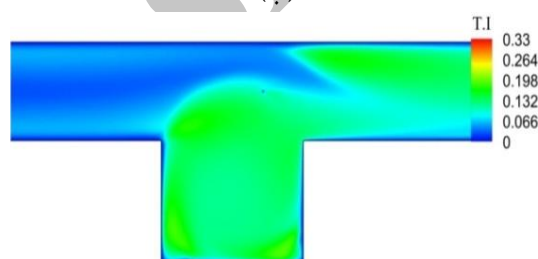
(ج)



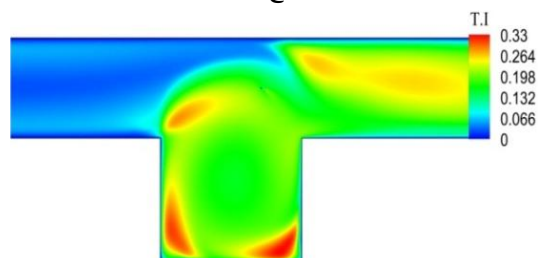
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۴- توزیع شدت آشفته‌گی در اعداد رینولدز مختلف

$$(d_2=5\text{cm و } d_1=2\text{cm} , V_0=24\text{kV})$$

$$\text{Re}=1100 \text{ (ج) } \text{Re}=500 \text{ (ب) } \text{Re}=100 \text{ (الف)}$$

در این حالت تأثیر میدان الکتریکی بر جریان سیال بیشتر است. با افزایش ولتاژ اعمالی، مولکول هوای بیشتری یونیزه شده، بنابراین چگالی بار الکتریکی در محیط افزایش می‌یابد و در نتیجه با افزایش چگالی بار الکتریکی در محیط، مقدار نیروی الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش نیروی الکتریکی منجر به برهم زدن بیشتر جریان سیال و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. تغییر در ولتاژ الکتریکی و اثرات آن بر خطوط جریان در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش ولتاژ اعمالی گردابه‌ای بزرگتر در منطقه فرارگیری شکاف ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش ولتاژ اعمالی، گردابه ایجاد شده در فضای بالای کانال حجیم‌تر می‌شود. دلیل این امر نیز افزایش قدرت و اثر میدان الکتریکی است که در واقع باعث

شکل ۱۳- توزیع شدت آشفته‌گی در ولتاژهای اعمالی مختلف

$$(d_2=5\text{cm و } d_1=2\text{cm} , \text{Re}=2400)$$

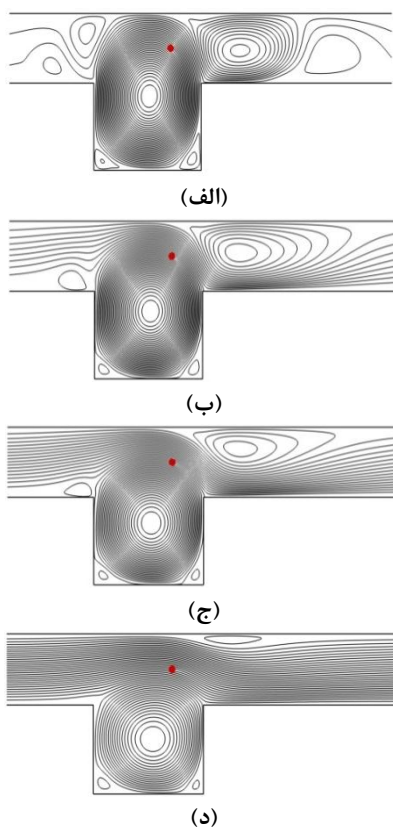
$$\text{V}_0=24\text{kV} \text{ (د) } \text{V}_0=20\text{kV} \text{ (ج) } \text{V}_0=16\text{kV} \text{ (ب) } \text{V}_0=0\text{kV} \text{ (الف)}$$

۴-۵- تأثیر ولتاژ اعمالی و عدد رینولدز جریان بر ضریب انتقال حرارت

در تحلیل پدیده الکتروهیدرودینامیک مادامی که ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد، جریان کرونای تخلیه شده بین الکتروود تزریق‌کننده و الکتروود جمع‌کننده نیز افزایش می‌یابد.

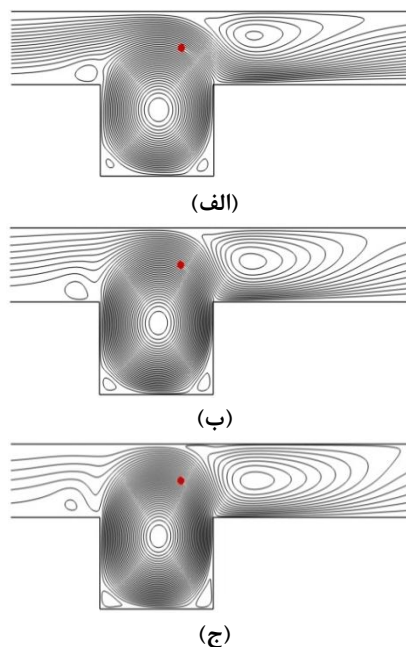
می‌شود جریان سیال با شدت بیشتری به سمت صفحه متصل به زمین هدایت شود.

یکی از متغیرهای مؤثر در پدیده الکترو هیدرودینامیک، عدد رینولدز جریان است. شکل ۱۶، جریان ثانویه تولید شده در کانال تحت تأثیر ولتاژ ۲۰kV را در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، در اعداد رینولدز پایین‌تر، تأثیر ولتاژ اعمالی بر سیال و انحراف آن بیشتر است. به عبارتی دیگر، انحراف سیال در اعداد رینولدز پایین‌تر به سمت قسمت متصل به زمین، باعث تولید گردابه‌ای قوی‌تر و حجیم‌تر می‌شود؛ در نتیجه به نظر می‌رسد که میدان الکتریکی در شرایطی که مومنتم جریان ورودی کمتر باشد، موثرتر واقع می‌شود و با افزایش مومنتم جریان ورودی از قدرت و حجم گردابه تولید شده کاسته می‌شود. البته ذکر این نکته ضروری است که با افزایش انحراف سیال به سمت الکتروود جمع‌کننده، گردابه‌ای حجیم‌تر در فضای بالای کانال ایجاد می‌شود و با افزایش عدد رینولدز جریان ورودی مشخص است که حجم و قدرت گردابه ایجاد شده کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶- خطوط جریان در حضور میدان الکتریکی در اعداد رینولدز مختلف ($d_2=5\text{cm}$ و $d_1=2\text{cm}$, $V_0=20\text{kV}$)
الف) $Re=100$ (ب) $Re=500$ (ج) $Re=1100$ و (د) $Re=2400$

همچنین توزیع دما در اعداد رینولدز مختلف تحت تأثیر میدان الکتریکی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، به دلیل وجود گردابه‌های بسیار قوی به خصوص در نزدیکی الکتروود تزریق‌کننده و شکاف، لایه مرزی حرارتی به شدت در این منطقه تحت تأثیر قرار گرفته است و سبب کاهش دمای صفحات گرم نسبت به حالتی که میدان الکتریکی حضور ندارد، شده است. در اعداد رینولدز پایین به دلیل تأثیر بیشتر نیروی الکتریکی بر مومنتم جریان ورودی، اثرات بیشتری از میدان الکتریکی مشاهده می‌شود؛ اما با افزایش عدد رینولدز و افزایش دبی جریان، حجم بیشتری از هوای خنک به داخل شکاف انتقال می‌یابد، اما با افزایش بیشتر عدد رینولدز، کاهش قدرت میدان الکتریکی باعث کاهش انحراف سیال



شکل ۱۵- خطوط جریان در حضور میدان الکتریکی در ولتاژهای مختلف ($d_2=5\text{cm}$ و $d_1=2\text{cm}$, $Re=500$)
الف) $V_0=16\text{kV}$ (ب) $V_0=20\text{kV}$ و (ج) $V_0=24\text{kV}$

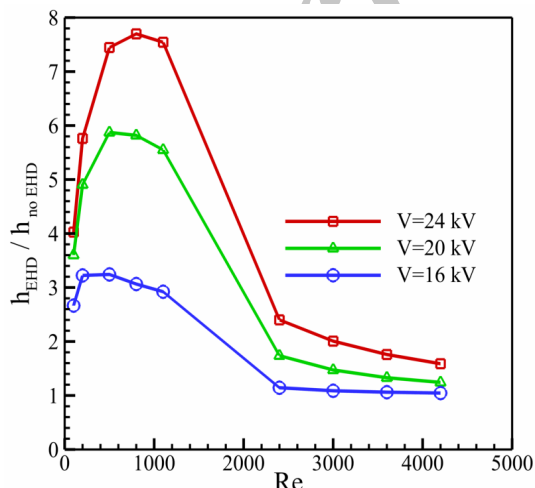
$$h_x = \frac{q''}{T_s - T_{ref}} \quad (11)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (12)$$

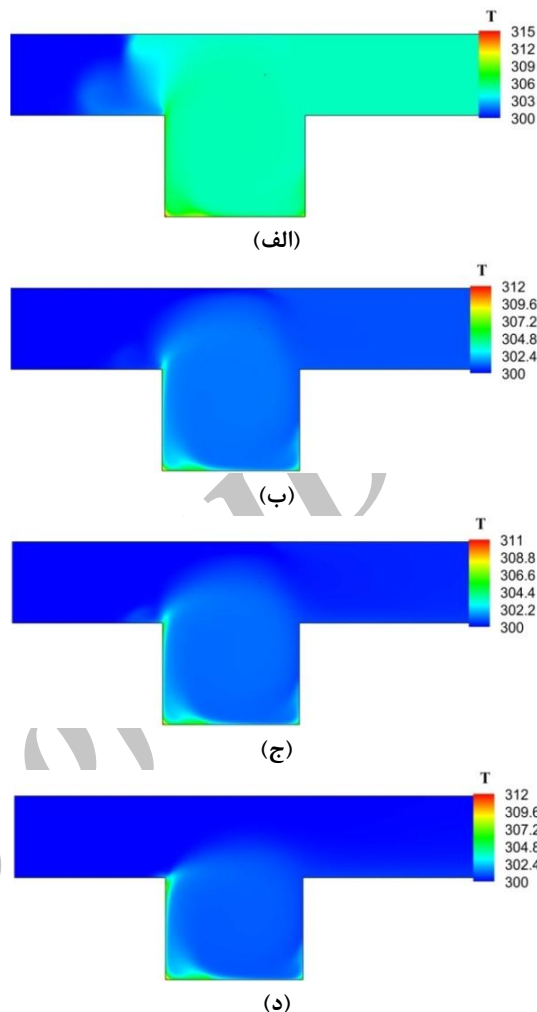
که در این روابط T_{ref} به عنوان دمای مرجع و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$T_{ref} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (13)$$

در این تحقیق، افزایش ضریب انتقال حرارت بر اساس نسبت ضریب انتقال حرارت متوسط در حضور میدان الکتریکی به حالتی تعریف می‌شود که میدان الکتریکی حضور ندارد. بر این اساس، شکل ۱۸ تغییرات این نسبت در اعداد رینولدز مختلف و برای ولتاژهای اعمالی مختلف را نشان می‌دهد. در این نمودار به‌طور واضح مشخص است که افزایش انتقال حرارت در یک ولتاژ ثابت تا یک عدد رینولدز مشخص افزایش یافته و پس از نقطه بیشینه، با افزایش بیشتر عدد رینولدز، کاهش می‌یابد. در واقع در اعداد رینولدز پایین دبی جریان پایین است و با افزایش عدد رینولدز، دبی جریان افزایش می‌یابد و با انحراف این حجم هوا به داخل شکاف انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش عدد رینولدز، قابلیت انحراف سیال تحت تاثیر میدان الکتریکی کاهش می‌یابد که انتظار می‌رود، انتقال حرارت نیز کاهش یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود، افزایش انتقال حرارت در ولتاژهای بالاتر به مراتب بیشتر است.



شکل ۱۸- نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت در عدد رینولدز و ولتاژهای اعمالی مختلف ($d_2=5\text{cm}$ و $d_1=2\text{cm}$)



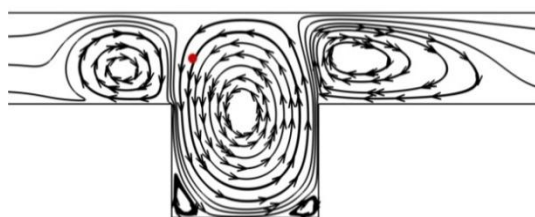
شکل ۱۷- توزیع دما در حضور میدان الکتریکی

$$(d_2=5\text{cm} \text{ و } d_1=2\text{cm}, V_0=20\text{kV})$$

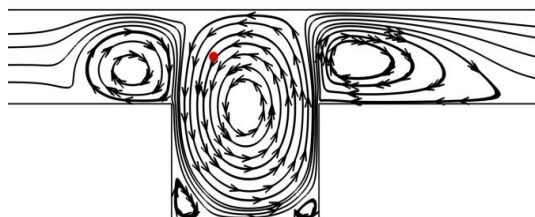
(الف) $Re=100$ ، (ب) $Re=500$ ، (ج) $Re=1100$ ، (د) $Re=2400$

خنک ورودی به سمت صفحات گرم می‌شود. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در گوشه سمت چپ شکاف، ناحیه تله حرارتی به شدت کاهش یافته و در واقع سبب کاهش بیشینه دمایی صفحات گرم شده است. البته برای کنترل بیشتر این ناحیه، می‌توان از آرایش‌های مختلف الکتروود تزریق کننده استفاده کرد.

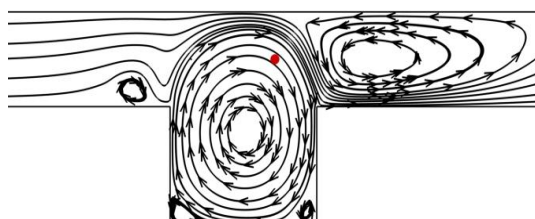
برای ارزیابی تاثیر پدیده الکتروودینامیک بر انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط به ترتیب مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند:



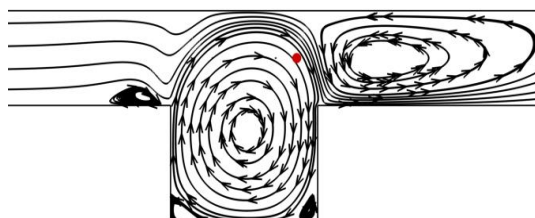
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۱۹- خطوط جریان در کانال با اعمال $V_0=24kV$ بر الکتروود تزریق‌کننده در فواصل افقی مختلف ($Re=500$) و $d_1=2cm$ (الف) $d_2=1cm$ (ب) $d_2=2cm$ (ج) $d_2=5cm$ و $d_2=6cm$ (د)

شکل ۲۰، ضریب انتقال حرارت موضعی دیواره سمت چپ در شکل ۲۱ و ضریب انتقال حرارت متوسط شکاف در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول ۳ مشخص است، انتقال حرارت با افزایش فاصله افقی الکتروود تزریق‌کننده از الکتروود جمع‌کننده کاهش می‌یابد. البته ذکر این نکته ضروری است که دلیل بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت در الکتروودهای نزدیک به لبه سمت چپ نسبت به الکتروودهای متناظرشان که نزدیک لبه سمت راست هستند،

۵-۵- تأثیر فاصله افقی الکتروود تزریق‌کننده از لبه

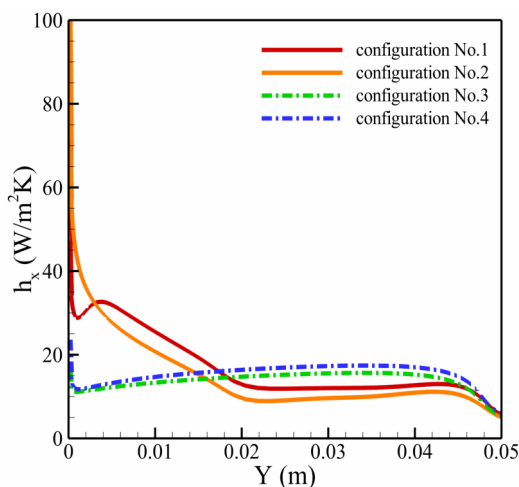
شکاف در الگوی جریان و ضریب انتقال حرارت

یکی از عوامل بسیار مهم در پدیده الکترودهیدرودینامیک، فاصله الکتروود تزریق‌کننده از الکتروود جمع‌کننده است. این فاصله در تولید جریان ثانویه قوی‌تر نقش بسزایی دارد؛ بنابراین بررسی تاثیر این فاصله از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. برای ارزیابی تأثیر فاصله الکتروود تزریق‌کننده از لبه‌های شکاف بر افزایش انتقال حرارت و الگوی جریان، آرایش‌های مختلفی از نقطه نظر فاصله افقی در نظر گرفته شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

شکل ۱۹، خطوط جریان که در فواصل مختلف بین الکتروود تزریق‌کننده و لبه سمت چپ شکاف در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، با افزایش فاصله الکتروود تزریق‌کننده از صفحه سمت چپ، جهت چرخش سیال داخل شکاف تغییر می‌کند که جهت چرخش گردابه می‌تواند بر مقدار انتقال حرارت موثر باشد.

همان‌گونه که در شکل ۱۹ مشخص است، با افزایش فاصله الکتروود تزریق‌کننده از صفحه سمت چپ، میزان انحرافی که توسط گردابه در مسیر جریان سیال اتفاق می‌افتد، کمتر شده است که موجب کاهش قدرت گردابه می‌شود. با دور شدن بیشتر از لبه سمت چپ و کم شدن فاصله الکتروود از صفحه سمت راست که آن نیز متصل به زمین است، جریان الکتريکی افزایش یافته و در نتیجه قدرت گردابه اصلی نیز افزایش می‌یابد؛ همچنین در آرایش‌هایی که الکتروود تزریق‌کننده نزدیک لبه سمت چپ است تمرکز پخش بار الکتريکی بیشتر به سمت صفحه سمت چپ شکاف است و در نتیجه گردابه اصلی پادساعتگرد بوده و جریان سیال خنک‌تر ابتدا با دیواره سمت چپ و سپس با دیواره پایین تماس پیدا می‌کند این در حالی است که در آرایش‌هایی که الکتروود تزریق‌کننده نزدیک لبه سمت راست است، پخش بار الکتريکی بیشتر در ناحیه سمت راست شکاف متمرکز بوده که باعث می‌شود، جهت گردابه اصلی ساعتگرد باشد و در واقع سیال خنک‌تر ابتدا با صفحه گرم پایین و سپس با صفحه گرم سمت چپ تماس پیدا می‌کند.

البته به منظور بررسی دقیق میزان تأثیر فاصله افقی، ضریب انتقال حرارت موضعی دیواره سمت راست در



شکل ۲۱- ضریب انتقال حرارت موضعی دیوار چپ شکاف در

آرایش‌های مختلف الکتروود تزریق‌کننده

$$(d_1=2\text{cm و } V_0=24\text{kV})$$

۵-۶- تأثیر فاصله افقی الکتروود تزریق‌کننده از لبه

شکاف در توان مصرفی

توان مصرفی در مکانیزم‌های افزایش انتقال حرارت به سبب مطرح شدن بحث هزینه مصرف انرژی، مانعی برای میل به افزایش انتقال حرارت به اندازه دلخواه است. برای به‌دست آوردن توان مصرفی نیاز به محاسبه جریان الکتریکی بین الکتروود تزریق‌کننده و جمع‌کننده حاصل از میدان الکتریکی است که از رابطه (۱۴) بدست می‌آید [۱۵]:

$$I = \int_A -\rho_c \beta \frac{\partial V}{\partial n} dA \quad (14)$$

در این رابطه، n متغیر فضایی مستقل و عمود بر خطوط هم‌پتانسیل است. با بدست آوردن جریان الکتریکی می‌توان توان مصرفی را از رابطه (۱۵) به‌دست آورد:

$$P = V \cdot I \quad (15)$$

همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، با فاصله گرفتن از لبه‌های شکاف به دلیل کم شدن قدرت تخلیه و کاهش بار الکتریکی، توان مصرفی نیز کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که الکتروودها با آرایش شماره ۱ و ۴ و الکتروودها با آرایش شماره ۲ و ۳، به دلیل تقارن، دارای بار الکتریکی یکسان و در نتیجه توان مصرفی یکسان هستند. برای ارزیابی عملکرد پدیده الکتروودپدیده‌ی پدیده‌ی معیار عملکرد این پدیده به عنوان پارامتری مهم طبق رابطه (۱۶) مورد بررسی قرار گرفته است:

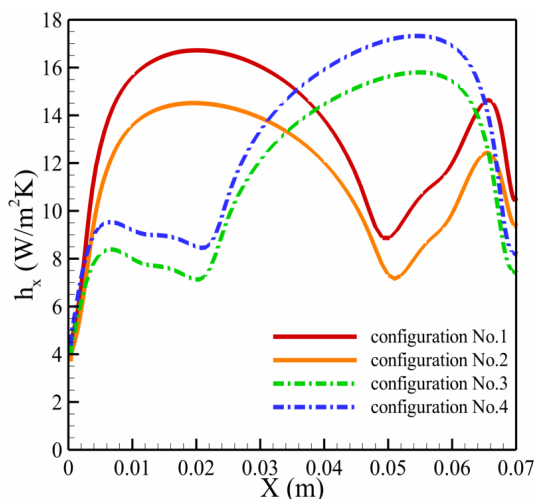
تمرکز و انحراف بیشتر سیال به دیواره سمت چپ است. در واقع همان‌گونه که به وضوح در شکل ۲۰ مشخص است، در نیمه ابتدایی دیوار پایین، الکتروودهای نزدیک به لبه سمت چپ و در نیمه انتهایی دیوار پایین، الکتروودهای نزدیک به لبه سمت راست موثرتر هستند؛ اما عامل تاثیرگذار در افزایش انتقال حرارت شکاف، خنک‌کاری بهتر ناحیه بالایی دیوار سمت چپ است که در الکتروودهای نزدیک به لبه سمت چپ اتفاق می‌افتد. شکل ۲۱، نشان دهنده همین موضوع است. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد، افت ضریب انتقال حرارت در گوشه‌های شکاف و در قسمتی از صفحه پایینی است که به علت وجود گردابه‌های کوچک و تشکیل تله حرارتی، اتفاق می‌افتد.

جدول ۳- ضریب انتقال حرارت متوسط در فواصل افقی

مختلف الکتروود از لبه شکاف ($V_0=24\text{kV}$, $Re=500$) و

$$(d_1=2\text{cm})$$

شماره آرایش الکتروود	فاصله الکتروود از لبه چپ شکاف (سانتی متر)	ضریب انتقال حرارت متوسط
۱	۱	۳۰/۵۱
۲	۲	۲۶/۵۱
۳	۵	۲۵/۳۵
۴	۶	۲۸/۱۸



شکل ۲۰- ضریب انتقال حرارت موضعی دیوار پایین شکاف

در آرایش‌های مختلف الکتروود تزریق‌کننده

$$(d_1=2\text{cm و } V_0=24\text{kV})$$

۵-۷- تاثیر میدان الکتریکی بر افت فشار جریان سیال

به منظور بررسی تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر افت فشار در یک کانال، نسبت ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز و فاصله الکتروود تزریق کننده از لبه شکاف بررسی شده است که ضریب اصطکاک از رابطه (۱۷) بدست می‌آید [۱۵]:

$$f = \frac{\nabla p}{(L/D_h) \frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (17)$$

در ∇p ، D_h و U_∞ به ترتیب، افت فشار استاتیکی در طول کانال، قطر هیدرولیکی کانال و سرعت ورودی جریان است.

در شکل ۲۳، نسبت ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز برای فواصل مختلف الکتروود تزریق کننده از لبه شکاف نشان داده شده است. همان‌گونه که در خطوط جریان در شکل ۱۹ مشخص شده است، در آرایش‌هایی که الکتروود تزریق کننده نزدیک لبه سمت راست است (آرایش‌های شماره ۳ و ۴)، جهت چرخش گردابه اصلی ساعتگرد بوده، همسو با جریان سیال ورودی است که این موضوع سبب می‌شود، تاثیر میدان الکتریکی بر خروجی جریان افزایش یافته و سبب ایجاد شتاب در این ناحیه شود؛ در نتیجه فشار در پایین دست جریان افزایش می‌یابد و نسبت ضریب اصطکاک مقداری منفی می‌شود که با افزایش عدد رینولدز به دلیل کاهش اثر میدان الکتریکی بر جریان سیال، افزایش می‌یابد. همچنین با فاصله گرفتن از لبه سمت راست به دلیل کاهش نیروی میدان الکتریکی و کم شدن تاثیر آن بر خروجی، مقدار فشار خروجی کاهش یافته و به تبع آن نسبت ضریب اصطکاک در مقایسه با الکتروود نزدیک‌تر به لبه سمت راست افزایش می‌یابد. علاوه بر این در آرایش‌هایی که الکتروود تزریق کننده نزدیک لبه سمت چپ است (آرایش‌های شماره ۱ و ۲)، جهت چرخش گردابه اصلی پادساعتگرد بوده و ناهمسو با جریان سیال ورودی است؛ در نتیجه به دلیل تاثیر بسیار کم میدان الکتریکی بر خروجی جریان و اتلاف اصطکاکی در جریان سیال ورودی که به واسطه هدایت جریان سیال به داخل شکاف ایجاد می‌شود، افت فشار و به واسطه آن نسبت ضریب اصطکاک مقداری مثبت است که با افزایش عدد رینولدز و فاصله گرفتن الکتروود از لبه سمت چپ این نسبت به دلیل کاهش اثر میدان الکتریکی بر جریان سیال کاهش

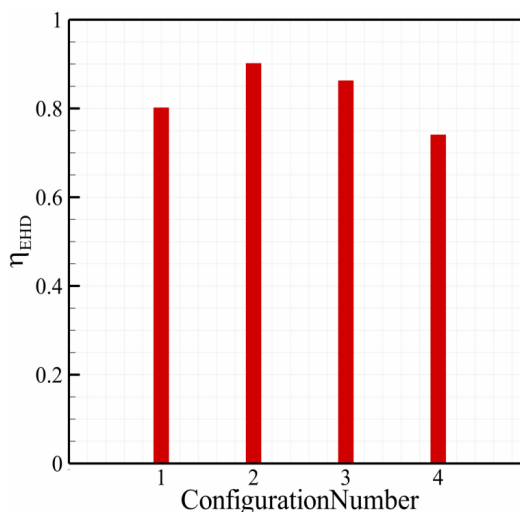
جدول ۴- همچنین توان مصرفی در فواصل مختلف الکتروود

از لبه شکاف ($d_1=2\text{cm}$ و $V_0=24\text{kV}$ ، $Re=500$)

توان مصرفی (وات)	فاصله الکتروود از لبه چپ شکاف (سانتی متر)	شماره آرایش الکتروود
۱۱/۱۷	۱	۱
۸/۶۳	۲	۲
۸/۶۳	۵	۳
۱۱/۱۷	۶	۴

$$\eta_{EHD} = \frac{h_{EHD}/h_{no.EHD}}{P} \quad (16)$$

بنا بر تعریف ضریب عملکرد، دو پارامتر افزایش انتقال حرارت و میزان مصرف انرژی الکتریکی نقش دارند؛ بنابراین انتظار می‌رود طبق تعریف، آرایشی دارای ضریب عملکرد بیشینه است که مصرف انرژی الکتریکی پایین‌تر و افزایش انتقال حرارت بالاتری داشته باشد. توان مصرفی انرژی الکتریکی در آرایش ۱ و ۴، همچنین در آرایش ۲ و ۳ باهم برابر هستند، اما افزایش انتقال حرارت در هر آرایش به دلیل جهت چرخش گردابه (ساعتگرد یا پادساعتگرد) و همچنین مقدار نیروی الکتریکی باهم متفاوت هستند؛ بنابراین با مقایسه تقابل بین انرژی الکتریکی و افزایش انتقال حرارت می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به آرایش‌های انتخاب شده، آرایش شماره ۲ بهترین ضریب عملکرد را داراست.



شکل ۲۲- ضریب عملکرد روش الکتروهیدرودینامیک در

آرایش‌های مختلف الکتروود تزریق کننده

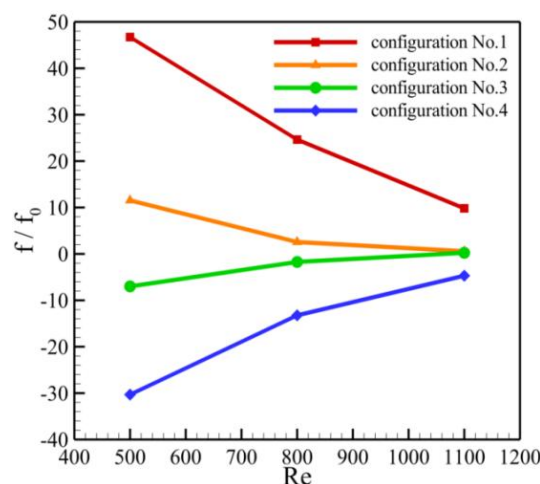
($d_1=2\text{cm}$ و $V_0=24\text{kV}$ ، $Re=500$)

انتقال حرارت افزایش می‌یابد که البته در آرایش‌هایی که نزدیک به لبه سمت چپ هستند، به دلیل انحراف و تمرکز بیشتر جریان ورودی به سمت دیواره‌های گرم، ضریب انتقال حرارت نسبت به الکترودهای نزدیک به لبه سمت راست بیشتر است.

- توان مصرفی در حضور میدان الکتریکی با دور شدن الکترودها تزریق‌کننده از لبه‌های شکاف به دلیل کاهش بار الکتریکی کاهش می‌یابد؛ همچنین در آرایش‌های نزدیک به لبه سمت چپ شکاف، به علت افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت به ازای یک واحد توان مصرفی، روش الکترودهیدرودینامیک عملکرد بهتری دارد.

- نسبت ضریب اصطکاک در حضور میدان الکتریکی به ضریب اصطکاک حالتی که میدان الکتریکی حضور ندارد، کاملاً وابسته به فاصله الکترودها تزریق‌کننده و جمع‌کننده و عدد رینولدز جریان است.

می‌یابد. همچنین لازم به ذکر است که در همه آرایش‌ها با افزایش عدد رینولدز به دلیل کاهش تاثیر میدان الکتریکی، نسبت ضریب اصطکاک به عدد ۱ میل می‌کند.



شکل ۲۳- نسبت ضریب اصطکاک در آرایش‌های مختلف الکترودها تزریق‌کننده ($d_1=2\text{cm}$ و $V_0=24\text{kV}$)

۷- فهرست علائم

ارتفاع شکاف، m	c_1
طول شکاف، m	c_2
ثابت مدل آشفتگی k-ε	C_μ
فاصله افقی الکترودها تزریق‌کننده تا لبه سمت چپ شکاف، m	d_1
فاصله عمودی الکترودها تزریق‌کننده تا دیوار بالایی کانال، m	d_2
شدت میدان الکتریکی، V/m	E
میدان الکتریکی در قانون پیک، V/m	E_0
ضریب اصطکاک	f
نیروی حجمی الکترودهیدرودینامیک، N/m^3	f_e
ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی، $\text{W/m}^2\cdot\text{k}$	h_x
ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط، $\text{W/m}^2\cdot\text{k}$	\bar{h}
ارتفاع کانال، m	H
چگالی جریان الکتریکی، A/m^2	J
انرژی جنبشی آشفتگی، J	k
طول کانال، m	L
طول ورودی کانال، m	L_i
طول خروجی کانال، m	L_o
متغیر عمود بر سطح	n

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مطالعه حاضر، مشخصه‌های جریان، انتقال حرارت، توان مصرفی و افت فشار جریان تحت تاثیر میدان الکتریکی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است که مهمترین نتایج بدست آمده به صورت زیر است:

- در اعداد رینولدز پایین، افزایش دبی جریان عاملی موثرتر است و در ولتاژ ثابت تا یک عدد رینولدز مشخص، افزایش انتقال حرارت بیشتر می‌شود و پس از آن با افزایش بیشتر عدد رینولدز، افزایش انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

- اگر ولتاژ اعمالی بر الکترودها تزریق‌کننده افزایش یابد، جریان کرونای حاصل از آن نیز افزایش می‌یابد و در اثر جریان کرونای بیشتر، نیروی ایجاد شده از طرف میدان الکتریکی بر جریان سیال بیشتر می‌شود؛ بنابراین افزایش نیروی حجمی ضمن برهم زدن بیشتر لایه مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود.

- تغییر در مکان قرارگیری الکترودها تزریق‌کننده، باعث تغییر در ضریب انتقال حرارت می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با نزدیک شدن به لبه‌های شکاف، میزان ضریب

- [4] Lai FC, Lai KW (2002) EHD-enhanced drying with wire electrode. *Drying Technol* 20: 1393-1405.
- [5] Lai FC, Wang CC (2008) Drying of partially wetted materials with corona wind and auxiliary heat. *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics Paper B1*.
- [6] Kasayapanand N, Tiansuwan J, Asvapoositkul W, Vorayos N, Kiatsiriroat T (2002) Effect of the electrode arrangements in a tube bank on the characteristic of electrohydrodynamic heat transfer enhancement: low reynolds number. *J Enhanc Heat Transf* 9: 229-242.
- [7] Ahmedou SO, Havet M (2009) Analysis of the EHD enhancement of heat transfer in a flat duct. *IEEE T Dielect El In* 16: 489-494.
- [8] Shakouri Pour M, Esmailzadeh E (2011) Experimental investigation of convective heat transfer enhancement from 3D-shape heat sources by EHD actuator in duct flow. *Exp Therm Fluid Sci* 35: 1383-1391.
- [9] Kasayapanand N, Kiatsiriroat T (2005) EHD enhanced heat transfer in wavy channel. *Int Commun Heat Mass* 32: 809-821. *IEEE T Dielect El In* 16: 489-494.
- [10] Alamgholilou, Esmailzadeh E, (2012) Experimental investigation on hydrodynamics and heat transfer of fluid flow into channel for cooling of rectangular ribs by passive and EHD active enhancement methods. *EXP Therm Fluid Sci* 38: 61-73.
- [11] Deylami H.M, Amanifard, N, Dolati F, Kouhikamali R, Mostajiri K, (2013) Numerical investigation of electrohydrodynamic effects on the airflow through corrugated channels. *J Mech Eng Sci* 12: 2730-2741.
- [12] Yazdani M, Seyed-Yagoobi J, (2014) Heat transfer enhancement of backstep flow by means of EHD conduction pumping. *Int J Heat Mass Transfer* 73: 819-825.
- [13] Adamiak K, Atten P (2004) Simulation of corona discharge in point-plane configuration. *Journal of electrostat* 61: 85-98. [14] Oussalah N, Zebboudj Y (2006) Finite-element analysis of positive and negative corona discharge in wire-to-plane system. *Eur Phys J Appl Phys* 34: 215-223.
- [15] Deylami HM, Amanifard N, Dolati F, Kouhikamali R, Mostajiri K (2013) Numerical investigation of using various electrode arrangements for amplifying the EHD enhanced heat transfer in a smooth channel. *J Electrostat* 277(12): 2730-2741.
- توان مصرفی، W
- شار حرارتی، W/m^2
- عدد رینولدز
- زمان، s
- دما، K
- شدت آشفستگی
- سرعت، m/s
- سرعت ورودی به کانال، m/s
- پتانسیل الکتریکی، V
- پتانسیل الکتریکی در الکتروود تزریق کننده، V
- مختصات در جهت افقی کانال، m
- مختصات در جهت عمودی کانال، m
- نفوذ حرارتی، m^2/s
- نفوذ حرارتی آشفستگی، m^2/s
- یون پذیری، $m^2/V.s$
- ضریب گذردهی الکتریکی، F/m
- ضریب عملکرد روش الکتروهیدرودینامیک
- لزجت دینامیکی، $kg/m.s$
- لزجت دینامیکی آشفستگی، $kg/m.s$
- چگالی، kg/m^3
- چگالی بار الکتریکی، C/m^3
- نفوذ الکتریکی، $1/\Omega.m$
- P
- q''
- Re
- t
- T
- $T.I$
- u
- U_{∞}
- V
- V_0
- x
- y
- علائم یونانی
- α
- α_t
- β
- ε
- η_{EHD}
- μ
- μ_t
- ρ
- ρ_c
- σ_E
- ۸- مراجع
- [1] Jewell-Larsen NE, Ran H, Zhang Y, Schwiebert MK, Honer KA (2009) Electrohydrodynamic (EHD) cooled laptop. 25th IEEE Semi-Therm Symposium: 261-266.
- [2] Moreau E, Léger L, Touchard G (2006) Effect of a DC surface-corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25 m/s. *J Electrostat* 64: 215-225.
- [3] Roberto S, Guillermo A (2006) Steady control of laminar separation over airfoils with plasma sheet actuators. *J Electrostat* 64: 604-610.