



بررسی عددی تاثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان و انتقال حرارت جابجایی اجباری روی یک پله پسرو

کامران مستجیری عبیدی^۱، نیما امانی فرد^۲، حامد محدث دبلمی^۳ و فرید دولتی^۴

^۱ دانشجوی دکترای 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 دکترای دانشکده فنی، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۳/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۲۶

چکیده

در مطالعه حاضر، میدان جریان و دما روی یک پله پسرو 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 و افت فشار مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج، نشان می‌دهد که در رینولدزهای پایین تر و ولتاژهای بالاتر، اعمال میدان الکتریکی تاثیر به‌سزایی در افزایش انتقال حرارت دارد. علاوه بر این کاهش فاصله الکتروود تزریق کننده از لبه پله، به طور چشم‌گیری سبب افزایش انتقال حرارت و تغییرات در افت فشار می‌شود.

کلمات کلیدی: الکتروهیدرودینامیک؛ پله پسرو؛ انتقال حرارت جابجایی اجباری؛ بررسی عددی.

Numerical investigation of the electric field effects on the flow and forced convection heat transfer over a backward-facing step

K. Mostajiri Abid¹, N. Amanifard², H. M. Deylami^{3,*} and F. Dolati⁴

¹Ph.D. 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 paper, 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 backward-facing step. The numerical modeling is based for 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 with the applied voltage but decreases when the Reynolds number are augmented. Moreover, reduction of distance between the emitting electrode and the step edge can significantly effect on the heat transfer enhancement and variations in pressure drop.

Keywords: Electrohydrodynamic; Backward-Facing Step; Forced Convection Heat Transfer; Numerical Investigation.

* نویسنده مسئول؛ تلفن:

آدرس پست الکترونیک: hmohaddesd@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

انقباض یا انبساط ناگهانی در سطح مقطع کانال‌ها یا به عبارتی دیگر، تغییرات ناگهانی در هندسه کانال، سبب 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 ناگهانی، مدل پله پسرو^۱ است. مطالعه جریان جابجایی اجباری و انتقال حرارت روی پله پسرو، به دلیل ایجاد مناطق بازگردشی و تشکیل مناطقی با انرژی کمینه و بیشینه، از اهمیت بالایی در علوم مهندسی برخوردار است؛ همچنین به دلیل وجود ناحیه کمینه تنش برشی و بیشینه نرخ انتقال حرارت در نزدیکی جریان برگشتی و وجود نقطه‌ای در گوشه پله پسرو که در آن کمینه نرخ انتقال حرارت رخ می‌دهد، این هندسه همواره مورد توجه محققان قرار گرفته است. شایان ذکر است که این هندسه از آنجایی دارای ارزش فراوانی است که بحث خنک‌کاری تراشه‌ها امروزه بسیار حائز اهمیت است.

لی^۲ و همکاران [۱]، در سال ۱۹۹۷ با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم، جریان آشفته روی یک پله پسرو را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که در اعداد رینولدز نسبتاً کم، اصطکاک سطحی بزرگی از جریان بازگشتی^۳ در منطقه بازگردش^۴ ایجاد می‌شود. علاوه بر این، بیشینه ضریب اصطکاک سطحی در حدود ۲/۵ برابر میزان اندازه‌گیری شده در آزمایشات تجربی در رینولدزهای بالا است.

در سال ۲۰۰۲، نای و آرملی^۵ [۲]، اثرات ارتفاع پله را روی ضریب انتقال حرارت و توزیع سرعت در کانال‌هایی با یک پله قائم در فضای سه بعدی و به صورت عددی، مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که با افزایش ارتفاع پله، مقدار ناسلت افزایش می‌یابد و کمینه مقدار ناسلت در گوشه پایینی پله رخ می‌دهد. در سال ۲۰۰۳، آرملی و همکاران [۳]، به صورت تجربی مشخصه‌های جریان سه بعدی داخل یک کانال با پله قائم را به ازای رینولدزهای مختلف، مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها حاکی از آن است که در عدد رینولدز کوچک‌تر از

۹۸/۵، هیچ ناحیه چرخشی در مجاورت دیواره وجود ندارد؛ همچنین آنها نشان دادند که در حوالی عدد رینولدز ۱۹۰، در ناحیه کوچکی در گوشه بالایی دیواره جانبی، گردابه آشکار می‌شود که این ناحیه به لحاظ اندازه، با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد.

ارتورک^۶ [۴] در سال ۲۰۰۸، توزیع سرعت داخل کانال‌های دوبعدی را به ازای رینولدزهای بسیار بالا و به صورت عددی بررسی کرده نشان داد که اندازه منطقه بازگردشی تقریباً به صورت خطی با عدد رینولدز تغییر می‌کند.

مشاتت^۷ [۵] در سال ۲۰۱۱، به صورت عددی به بررسی جریان آشفته و انتقال حرارت روی یک پله پسرو با موانع تولید آشفته‌گی پرداخت. او تاثیر ارتفاع پله، تعداد موانع و ضخامت آنها را بررسی کرد و نشان داد که قدرت و اندازه محدوده بازگردش در پشت پله با افزایش ارتفاع پله، افزایش می‌یابد و اندازه محدوده بازگردش و طول منطقه بازگشتی^۸ بعد از موانع با افزایش ارتفاع پله کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که اشاره شد، در انبساط ناگهانی به دلیل تشکیل نقطه‌ای که کمینه انتقال حرارت در آن رخ می‌دهد [۳]، ضریب عملکرد حرارتی کاهش می‌یابد. برای از بین بردن این نقاط کمینه و افزایش انتقال حرارت، روش‌های مختلفی وجود دارد. شانزده روش مختلف برای افزایش انتقال حرارت جابجایی توسط برگلز^۹ و همکاران [۶-۸]، در سال‌های ۱۹۸۳، ۱۹۹۱ و ۱۹۹۵ معرفی شده‌اند که می‌توانند در دو گروه عمده روش‌های غیرفعال و فعال طبقه‌بندی شوند. وجه تمایز اولیه روش‌های مختلف افزایش انتقال حرارت جابجایی، این است که برخلاف روش‌های فعال، روش‌های غیرفعال به اعمال توان خارجی نیازی ندارند؛ همچنین اساس روش‌های غیرفعال، بر ایجاد تغییر یا جاسازی ابزارهای اضافی در هندسه سطوح و یا افزودن موادی به سیال است. به جز سطوح گسترش یافته که سطح انتقال حرارت موثر را افزایش می‌دهند، بقیه روش‌های غیرفعال در اثر آشفته کردن یا تغییر رفتار جریان، ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهند که این امر، با افزایش افت فشار نیز همراه است. در

¹ Backward-facing step

² LE

³ Reverse flow

⁴ Recirculation region

⁵ Nie and Armaly

⁶ Erturk

⁷ Mushatet

⁸ Reattachment

⁹ Bergles

در ابتدا جریان الکتریکی بسیار ضعیفی شکل می‌گیرد و با افزایش تدریجی ولتاژ اعمالی، جریان الکتریکی هم به‌طور تدریجی افزایش می‌یابد. از یک ولتاژ معینی به بعد، با افزایش بیشتر ولتاژ اعمالی اگرچه ولتاژ تغییر می‌کند؛ اما 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.

در این پدیده، با انتقال مومنتم توسط یون‌های ایجاد شده به جریان اصلی درون کانال و برهم زدن الگوی آن توسط گردابه‌های ایجاد شده، لایه مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی تحت تاثیر قرار می‌گیرند و این امر، باعث افزایش انتقال حرارت در کانال‌ها می‌شود. اخیراً انتقال حرارت اجباری در کانال‌ها تحت تاثیر باد کرونا به دلیل کاربرد این پدیده در زمینه افزایش انتقال حرارت به یکی از بحث‌های مورد علاقه تبدیل شده است. روش‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت در کانال‌ها وجود دارد، اما پدیده الکتروهیدرودینامیک به دلیل نداشتن ارتعاش و سر و صدا، مصرف کم و کنترل سریع جهت جریان، از روش‌های پرکاربرد به‌شمار می‌رود. امروزه بررسی مشخصه‌های EHD و تاثیر آن بر میدان جریان و آهنگ انتقال حرارت جابجایی در جریان‌های اجباری هوا، مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است.

کاساپایاناند و کیاتسیریرات^۱، افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری حاصل از اعمال روش EHD در کانال موجی شکل را به صورت عددی بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن 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 روش EHD هستند؛ همچنین در آرایش بهینه الکترودها، به علت سرعت بالای جریان در اطراف دیواره موجی شکل، ضریب بازدارندگی متوسط بیشترین مقدار را نسبت به آرایش‌های دیگر دارا است.

روش‌های فعال، اعمال نیروهای خارجی بر سیال موجب تغییر میدان جریان سیال و افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. یکی از روش‌های فعال جهت افزایش انتقال حرارت، استفاده از میدان الکتریکی ایجاد شده توسط منبع ولتاژ بالا است. در این روش، با اعمال میدان الکتریکی ولتاژ بالا و در نتیجه یونیزاسیون سیال دی الکتریک اطراف الکترودها ولتاژ بالا و حرکت این یون‌ها به سمت الکترودها ولتاژ پایین، جریان ثانویه‌ای در سیال تولید می‌شود که به این پدیده، الکتروهیدرودینامیک (EHD) می‌گویند. در یک محرک الکتروهیدرودینامیک واقع در داخل یک گاز همانند هوا، با برقراری یک اختلاف ولتاژ بالای الکتریکی بین دو الکترودها در اثر یونیزاسیون و رانده شدن یون‌ها از الکترودها تزریق‌کننده به سمت الکترودها جمع‌کننده در اثر نیروهای الکتریکی و برخورد با ذرات خنثی سیال تبادل اندازه حرکت انجام می‌دهند و سبب به حرکت در آوردن سیال به صورت توده‌ای می‌شوند. این حرکت توده‌ای الفاء شده در سیال، به نام باد یونی یا باد کرونا شناخته می‌شود. به‌منظور ایجاد باد کرونا از هر دو نوع ولتاژ مثبت و منفی، می‌توان استفاده کرد. در حالت اعمال ولتاژ مثبت به الکترودها 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 الکترودها دیگر رانده می‌شوند؛ اما در حالت اعمال ولتاژ منفی با افزایش ولتاژ، یون‌های منفی به سمت الکترودها دیگر رانده می‌شوند و یون‌های مثبت در اطراف الکترودها تزریق‌کننده تجمع می‌کنند. تخلیه کرونای منفی، بی‌نظمی‌هایی در ایجاد نیروی الکتروهیدرودینامیک ایجاد می‌کند. تخلیه کرونای منفی برخلاف کرونای مثبت، به‌طور ناپیوسته در طول الکترودها 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، کرونای مثبت به طور پیوسته در سرتاسر الکترودها تزریق‌کننده پخش می‌شود؛ در حالی که کرونای منفی در مکانی از طول سیم که دارای ناهمواری باشد، تمایل به تخلیه دارد. با برقراری یک اختلاف ولتاژ الکتریکی بین دو الکترودها تزریق‌کننده و جمع‌کننده در اثر یونیزاسیون و رانده شدن یون‌ها به سمت الکترودها جمع‌کننده،

^۱ Kasayapan and Kiatsirirot

همراه با موانع مستطیلی مستقر در کف آن را در حضور میدان الکتریکی ولتاژ بالا به صورت تجربی بررسی کردند. آنها با ساخت یک منطقه مطالعاتی و قرار دادن منابع گرمایی در داخل موانع، برای افزایش انتقال حرارت جابجایی از سه روش غیر فعال، فعال و ترکیبی استفاده کردند. مطالعه آنها نشان داد که روش غیرفعال، در آرایش زیگزاگی سوراخ‌ها 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 ۱۲۶۸٪ گزارش شد؛ اما تأثیر روش فعال EHD و روش ترکیبی در اعداد رینولدز پایین (۵۰۰ $Re =$ بیشتر است؛ همچنین حداکثر افزایش آهنگ انتقال حرارت متوسط و موضعی با استفاده از روش EHD به ترتیب برابر، ۱۶۳٪ و ۴۰۲٪ و در روش ترکیبی به ترتیب برابر، ۲۰۶٪ و ۶۷۶٪ است.

دیلمی و همکاران [۱۴]، به صورت عددی تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیک بر انتقال حرارت اجباری را داخل کانال مسطح برای جریان آشفته بررسی کردند. آنها نشان دادند که EHD در رینولدزهای پایین تر، شعاع الکتروود تزریق کننده کوچک تر و ولتاژهای بالاتر، تأثیر بسزایی در افزایش ضریب انتقال حرارت دارد. آنها همچنین تأثیر تعداد الکتروود تزریق کننده و نحوه آرایش الکتروود تزریق کننده را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنها حاکی از آن است که قدرت گردابه‌های ایجاد شده و در نتیجه افزایش انتقال حرارت، وابسته به تعداد و آرایش الکتروودها است.

در تحقیق حاضر، ابتدا به بررسی تأثیر عدد رینولدز و ولتاژهای اعمالی مختلف با قطب مثبت بر میدان جریان، ضریب انتقال حرارت و افت فشار در جریان عبوری از روی یک پله پسرو که در یک کانال تعبیه شده، پرداخته و سپس تأثیر مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده از لبه پله، مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- هندسه مسئله و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

نمایی شماتیک از هندسه دو بعدی و دامنه محاسباتی مدل موردنظر در شکل ۱، نمایش داده شده است. ناحیه محاسباتی از لبه پله تا ورودی جریان و از لبه پله تا خروجی جریان به ترتیب، حدوداً ۱۰H و ۲۰H امتداد یافته که فاصله مناسبی است تا شبیه‌سازی عددی جریان تحت تأثیر مرزهای ورودی

تطهیری^۱ و همکاران [۱۰]، به صورت تجربی اثرات وجود مانع دی‌الکتریک، در سرعت القایی لایه مرزی در هوای ساکن، در باد کرونای ناشی از میدان جریان مستقیم و متناوب را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که وجود مانع دی‌الکتریک در میدان جریان مستقیم، سبب کاهش سرعت جریان در لایه مرزی می‌شود؛ در حالی که با وجود مانع دی‌الکتریک در میدان جریان متناوب، می‌توان به سرعت‌های بسیار بیشتری در لایه مرزی دست یافت.

دیلمی^۲ و همکاران [۱۱]، اثرات پدیده الکتروهیدرودینامیک را در جریان هوا داخل کانال شیاردار به صورت عددی بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن پروفیل‌های 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 تأثیرگذاری میدان الکتریکی بر جریان سیال در اعداد رینولدز پایین و ولتاژ اعمالی بالا، بیشتر است و بیشترین ضریب بهبود عملکرد حرارتی در حضور میدان الکتریکی در پروفیل مستطیلی نسبت به دیگر پروفیل‌ها حاصل شده است.

یزدانی و سید یعقوبی^۳ [۱۲]، به صورت عددی به مطالعه افزایش انتقال حرارت با پمپ هدایت الکتروهیدرودینامیکی 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 الکتروهیدرودینامیک، حجم ناحیه بازگردشی ایجاد شده را کاهش داد؛ همچنین نشان دادند که استفاده از پدیده الکتروهیدرودینامیک به منظور افزایش انتقال حرارت در اعداد رینولدز پایین تر موثرتر است.

علم‌قلیلو و اسماعیل‌زاده^۴ [۱۳]، مشخصه‌های انتقال حرارت و هیدرودینامیک جریان‌های اجباری داخل یک کانال

¹ Tathiri

² Deylami

³ Yazdani and Seyed-Yagoobi

⁴ Alamgholilou and Esmaeilzadeh

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

در رابطه (۱) ρ_c ، \vec{E} ، ϵ و ρ به ترتیب بردار میدان الکتریکی، چگالی بار الکتریکی، ضریب گذردهی الکتریکی و چگالی سیال هستند. مولفه‌های این نیرو به ترتیب، از چپ به راست، نیروی کولمب، نیروی دی‌الکتروفورتیک و نیروی الکترواستریکشن 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 خواهد بود که در رابطه (۲)، نشان داده شده است. این نیروی حجمی از حل همزمان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی تعیین می‌شود [۱۱].

$$f_e = \rho_c \vec{E} \quad (2)$$

معادلات پواسون و بقای جریان الکتریکی، به عنوان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی، به صورت روابط (۳) و (۴) تعریف می‌شوند [۱۱]:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (J) = 0 \quad (4)$$

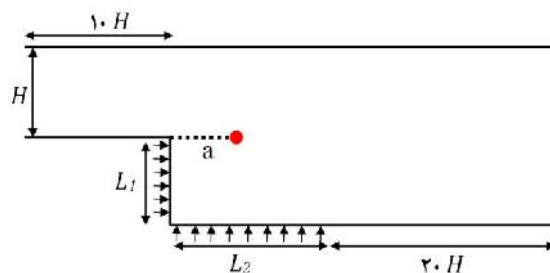
که در این رابطه، J چگالی جریان الکتریکی به صورت رابطه (۵) است:

$$J = \rho_c \beta \vec{E} + \rho_c \vec{u} + \sigma \vec{E} - D_e \nabla \rho_c \quad (5)$$

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 (۵) به ترتیب، تحرک یونی، جابجایی، هدایت الکتریکی و پخش بار الکتریکی نامیده می‌شوند. به دلیل اینکه بزرگی تحرک یونی در پدیده الکتروهایدرودینامیک نسبت به جابجایی، هدایت الکتریکی و پخش بار الکتریکی از مرتبه بالاتری برخوردار است، از عبارت‌های جابجایی، هدایت الکتریکی و پخش بار الکتریکی صرف نظر می‌شود.

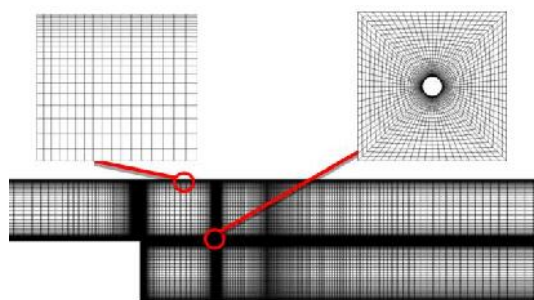
با در نظر گرفتن رابطه بین پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی ($E = -\nabla V$) و همچنین جاگذاری معادله (۵) در معادله (۴)، معادله (۶) حاصل می‌شود:

و خروجی قرار نگیرد؛ همچنین ارتفاع ورودی کانال ۵ سانتی‌متر، شعاع الکتروود تزریق‌کننده ۰/۲ میلی‌متر است. ناحیه L_1 به طول ۰/۰۵ m و L_2 به طول ۰/۱ m تحت شار حرارتی یکنواخت در نظر گرفته شده است. مقدار a نیز، به عنوان پارامتری جهت تعیین مکان قرارگیری الکتروود تزریق‌کننده است.



شکل ۱- هندسه و دامنه محاسباتی مدل

شبکه‌بندی هندسه مورد تحلیل، به کمک نرم‌افزار Gambit انجام گرفته و شبکه ایجاد شده به صورت سازمان‌یافته، غیر یکنواخت و چهاروجهی است؛ همچنین به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان‌های نزدیک دیواره، الکتروود تزریق‌کننده و لبه پله که گرادیان‌های شدید وجود دارد، از شبکه‌بندی با تراکم بیشتری استفاده شده است. در شکل ۲، نمایی از شبکه محاسباتی نشان داده شده است.



شکل ۲- شبکه محاسباتی

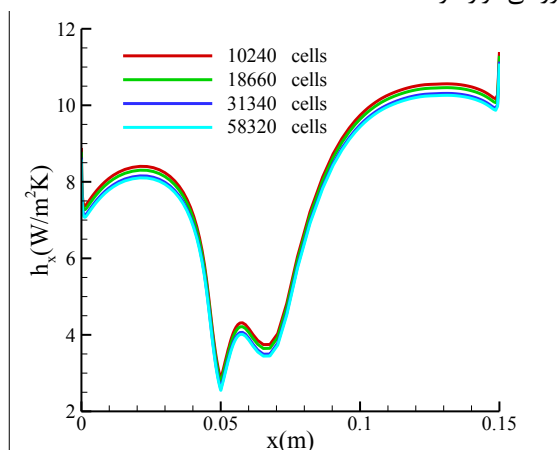
۳- معادلات حاکم بر میدان الکتریکی و میدان جریان

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

خالص شار جرمی به میزان کمتر از ۰/۲٪ شار کل و رصد کردن تغییرات کمیت‌های مهم جریان در نواحی حساس لحاظ شده‌اند.

۴-۱- بررسی استقلال از شبکه

به منظور اطمینان از دقت حل عددی، لازم است اثر تعداد المان‌ها در شبکه‌بندی‌های مختلف بر پارامترهای مسئله مورد بررسی قرار گیرد. به همین جهت، در عدد رینولدز و ولتاژ اعمالی مشخص، ضریب انتقال حرارت موضعی روی دیواره متصل به زمین در شبکه‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است، با افزایش تعداد شبکه از ۳۱۳۴۰، تغییر چندانی در ضریب انتقال حرارت موضعی مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین برای کاهش زمان محاسبات، از همین تعداد سلول استفاده شده است؛ همچنین استقلال شبکه برای دیگر شرایط نیز، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۳ - بررسی استقلال از شبکه، (a=۶cm)

$$V_0=118kV, Re=2122$$

۵- 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 فشار خروجی 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

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (-\beta \rho_c \nabla V) = 0 \quad (6)$$

به این ترتیب، معادلات (۳) و (۶) معادلات اساسی حاکم بر میدان الکتریکی هستند که به منظور تعیین نیروی کولمب برای هر سلول به طور همزمان حل می‌شوند. به منظور حل همزمان این معادلات مشتقات پاره‌ای جزئی و تعیین پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی از UDF نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است که بر پایه برنامه به زبان C می‌باشد. شایان ذکر است، پس از محاسبه نیروی الکتریکی، این نیرو به عنوان چشمه به معادلات مومنتم اضافه می‌شود.

۴- روش حل عددی

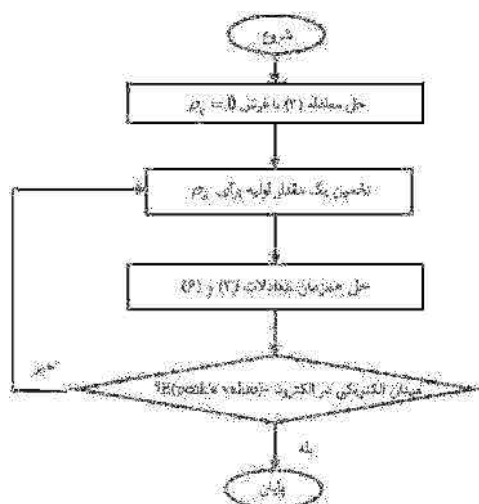
مدل عددی با استفاده از بسته نرم‌افزاری فلوئنت شبیه‌سازی شده است و معادلات بنیادی با استفاده از کد استاندارد این برنامه، در یک میدان دوبعدی تراکم‌ناپذیر و آشفتگی حل شده‌اند. با توجه به اینکه فیزیک جریان در پدیده الکتروهایدرودینامیک یک فیزیک متلاطم است، بنابراین برای مدل‌سازی جریان سیال در کانال، علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی، باید یک مدل آشفتگی مناسب نیز برای تحلیل اثر آشفتگی به کار گرفته شود. جهت مدل‌سازی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای k-ε استاندارد بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس به کار رفته، لذا دستگاه معادلات پیوستگی، مومنتم و معادلات انتقال k و ε با در نظر گرفتن نیروی حجمی حاصل از اعمال میدان الکتریکی مطابق معادلات (۷)، (۸) و (۹) است [۱۵]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (7)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + (\mu + \mu_t)\nabla^2 u + f_e \quad (8)$$

$$\mu_t / \rho = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (9)$$

حل عددی معادلات (۷) تا (۹) توسط حل‌کننده بر پایه فشار صورت گرفته، 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. 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. علاوه بر آن، کاهش



شکل ۴ - فلوجارت حل معادلات میدان الکتریکی

زمین مقدار صفر و در دیگر مرزها گرادیان پتانسیل الکتریکی برابر صفر است. همچنین شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی نیز در کل دامنه محاسباتی در جدول ۱، نشان داده شده است.

جدول ۱- شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی

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

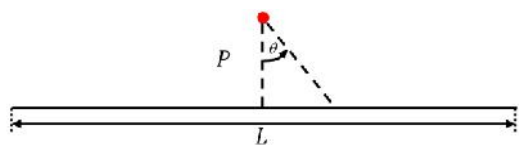
از آنجایی که شرایط مرزی برای یک مسئله، با توجه به شرایط فیزیکی مطرح می‌شوند و تعداد شرایط مرزی نیز وابسته به نوع معادلات است، بنابراین تعیین شرایط مرزی برای بار الکتریکی روی الکتروود تزریق کننده با سعی و خطا قابل محاسبه است. بر این اساس، از فرضیه کاپتروف و قانون پیک به منظور تعیین بار الکتریکی استفاده 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 [۱۶]:

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

در این رابطه r ، شعاع الکتروود تزریق کننده برحسب سانتی‌متر است. قانون پیک در تحلیل عددی به طور غیرمستقیم در یافتن مقدار بار الکتریکی قابل استفاده است. در این روش، بار الکتریکی روی الکتروود تزریق کننده حدس زده می‌شود و سپس اندازه میدان الکتریکی روی الکتروود تزریق کننده محاسبه می‌شود که در صورت تفاوت اندازه میدان الکتریکی محاسبه شده در تحلیل عددی با مقدار پیک (تفاوت بیشتر از 10^{-6})، حدس دیگری برای بار الکتریکی انتخاب می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که اندازه میدان الکتریکی محاسبه شده با مقدار به دست آمده از رابطه پیک، تفاوت ناچیزی داشته باشد. روند حل عددی معادلات میدان الکتریکی به صورت یک فلوجارت در شکل ۴، نشان داده شده است.

۶- نتایج

در مطالعه حاضر، جهت حصول اطمینان از صحت نتایج، نتایج تحلیل عددی به دست آمده با نتایج تجربی اوسالا و زوج [۱۷] مقایسه شده است. آنها به صورت تجربی، توزیع میدان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی روی یک صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند. هندسه مورد مطالعه آنها به صورت شماتیک در شکل ۵، نشان داده شده است. در تحقیق آنها طول صفحه $L = 0.16$ m، شعاع الکتروود تزریق کننده $r = 0.12$ mm و فاصله الکتروود تزریق کننده تا الکتروود جمع کننده $P = 0.15$ m در نظر گرفته شده است؛ همچنین θ زاویه بین خط عمود بر صفحه پایینی و خط واصل بین الکتروود تزریق کننده به مکانی از الکتروود جمع کننده است.



شکل ۵- نمایی از هندسه مطالعاتی اوسالا و زوج [۱۷]

به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی حاضر، در شکل‌های ۶ و ۷ توزیع چگالی جریان الکتریکی و میدان الکتریکی 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.

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 یونیزاسیون 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.

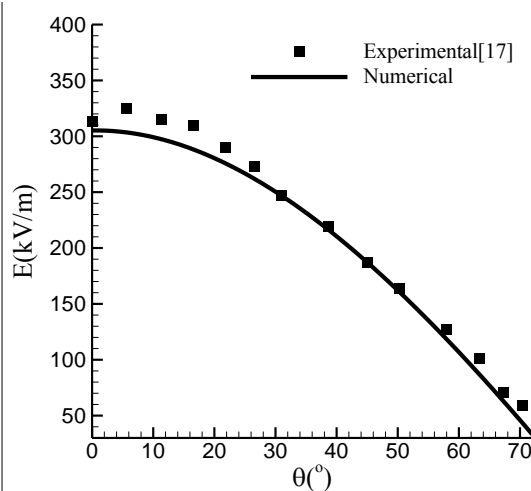


شکل ۸- توزیع پتانسیل الکتریکی ($a=6\text{cm}$)،
 $V_0=18\text{kV}$

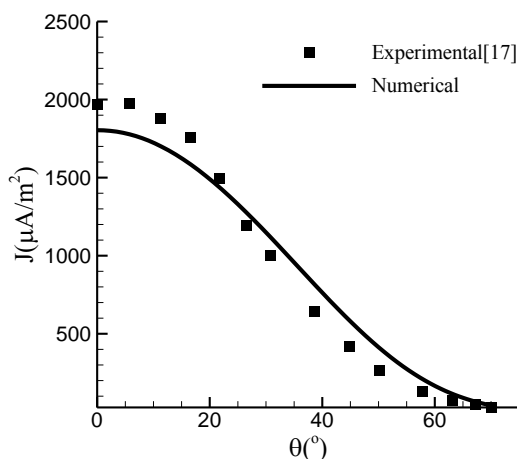


شکل ۹- توزیع چگالی بار الکتریکی ($a=6\text{cm}$)،
 $V_0=18\text{kV}$

۶-۲- تاثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان و دما
قبل از بررسی تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک داخل کانال و تاثیر آن بر میدان جریان و دما روی یک پله پسرو، مطالعه دقیق رفتار جریان بدون حضور میدان الکتریکی این امکان را فراهم می‌کند تا با مقایسه تغییر مشخصه‌های میدان جریان سیال و دما، نقش پدیده الکتروهیدرودینامیک در افزایش انتقال حرارت مشخص شود. در شکل ۱۰، خطوط جریان عبوری از روی پله را در دو عدد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، در عدد رینولدز پایین‌تر با توجه به عبور جریان از روی پله و تغییر ناگهانی سطح مقطع کانال و همچنین در اثر جدایش جریان، دو گردابه با اندازه‌های بسیار متفاوت در منطقه انبساط جریان و یک گردابه دیگر در نزدیکی دیواره بالایی به وجود آمده است. از طرفی دیگر، در عدد رینولدز بالاتر به علت مومنتم ورودی بیشتر، جریان تا حدی قابلیت مقابله با اثرات تغییر سطح را داشته، به‌صورتی که گردابه بالایی به طور کامل از بین رفته است؛ ولی گردابه‌ها در منطقه انبساط هنوز



شکل ۶- مقایسه توزیع میدان الکتریکی حاصل از
تحلیل عددی و نتایج تجربی ($V_0=18\text{kV}$)

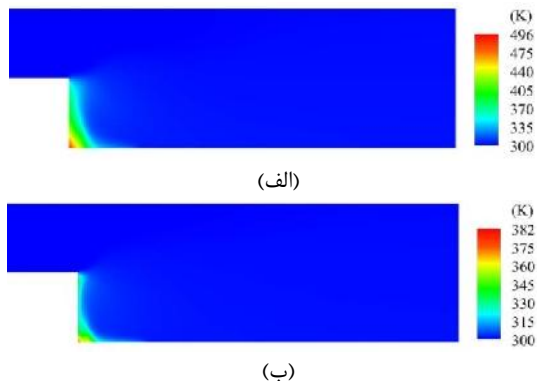


شکل ۷- مقایسه توزیع چگالی جریان الکتریکی حاصل
از تحلیل عددی و نتایج تجربی ($V_0=18\text{kV}$)

۶-۱- نتایج تحلیل میدان الکتریکی

به منظور بررسی میدان الکتریکی حاصل از اعمال ولتاژ بالای الکتریکی به الکتروود تزریق‌کننده، توزیع پتانسیل و چگالی بار الکتریکی، در شکل‌های ۸ و ۹ 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 روی الکتروود تزریق‌کننده برابر 0.0000885 C/m^3 است و با فاصله گرفتن از سطح الکتروود تزریق‌کننده، چگالی بار

ناگهانی می‌شود. البته به منظور تعیین تاثیر این پدیده بر انتقال حرارت، نیاز به بررسی ضریب انتقال حرارت است.



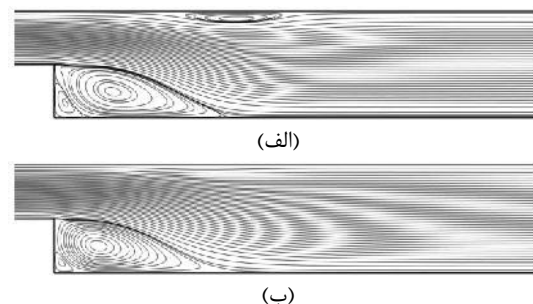
شکل ۱۱- توزیع تابع دما در حالت عدم حضور میدان الکتریکی ($a=6\text{cm}$) (الف) $Re=753$ (ب) $Re=2122$



۳-۶- تأثیر عدد رینولدز جریان در پدیده الکتروهیدرودینامیک

یکی از پارامترهای مؤثر بر پدیده الکتروهیدرودینامیک در جریان‌های جابجایی اجباری، عدد رینولدز ورودی جریان سیال است. شکل ۱۳، جریان ثانویه تولید شده در کانال تحت تأثیر ولتاژ ۱۸ kV را در رینولدزهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در رینولدزهای پایین‌تر یعنی مادامی که مومنتم جریان ورودی کمتر است تأثیر ولتاژ اعمالی بر سیال و انحراف آن بیشتر می‌باشد. به عبارتی دیگر، انحراف سیال در رینولدزهای پایین‌تر به سمت قسمت متصل به زمین باعث تولید گردابه‌ای قوی‌تر و حجیم‌تر در زیر الکتروود تزریق کننده می‌شود. در نتیجه به نظر می‌رسد که پدیده الکتروهیدرودینامیک 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

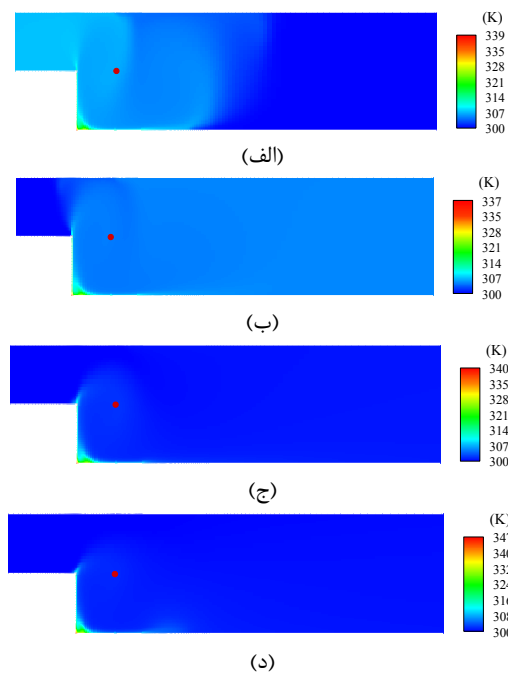
وجود داشته، به نظر می‌رسد که یک گردابه نسبتاً کوچک در گوشه پله در هر دو عدد رینولدز ایجاد شده است.



شکل ۱۰- خطوط جریان بدون حضور میدان الکتریکی ($a=6\text{cm}$) (الف) $Re=753$ (ب) $Re=2122$

همچنین در شکل ۱۱، توزیع دما در کانال را برای دو عدد رینولدز نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در رینولدزهای پایین، لایه مرزی حرارتی کمتر تحت تاثیر جریان ورودی قرار گرفته، به عبارتی قدرت گردابه در این منطقه، ناچیز است؛ اما با افزایش عدد رینولدز، قدرت این گردابه افزایش یافته و لایه مرزی حرارتی به شدت تحت تاثیر جریان ورودی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج حاضر، ذکر این نکته حائز اهمیت است که در همه اعداد رینولدز خصوصاً اعداد رینولدز پایین، در گوشه پله یک نقطه با بیشینه دما قابل مشاهده است. علاوه بر این، به وضوح قابل مشاهده است که بیشینه دما در گوشه پله با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد و دلیل ایجاد این نقطه را می‌توان به این صورت توجیح کرد که در این ناحیه، یک گردابه کوچک تشکیل شده و مانع از رسیدن هوای خنک ورودی به این ناحیه می‌شود. به عبارتی دیگر، جدایش گردابی از تماس سیال خنک با سطح کانال جلوگیری می‌کند.

به منظور بررسی تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر میدان جریان، خطوط جریان در حضور میدان الکتریکی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که بیان شد، بدون حضور میدان الکتریکی و به دلیل جدایش جریان، گردابه‌ای نسبتاً حجیم در منطقه انبساط یافته تشکیل می‌شود. در شکل ۱۲ با اعمال میدان الکتریکی به الکتروود تزریق کننده، جریان هوا ورودی خنک با شدت بیشتری به سمت صفحه دارای شار حرارتی منحرف می‌شود. این انحراف جریان ورودی، سبب ایجاد گردابه‌هایی حجیم در منطقه انبساط



شکل ۱۴- توزیع دما در حضور میدان الکتریکی در اعداد رینولدز مختلف (a=۶cm)
 الف) Re=۳۴۲ (ب) Re=۷۵۳ (ج) Re=۲۱۲۲ (د) Re=۲۹۴۳

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

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

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

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

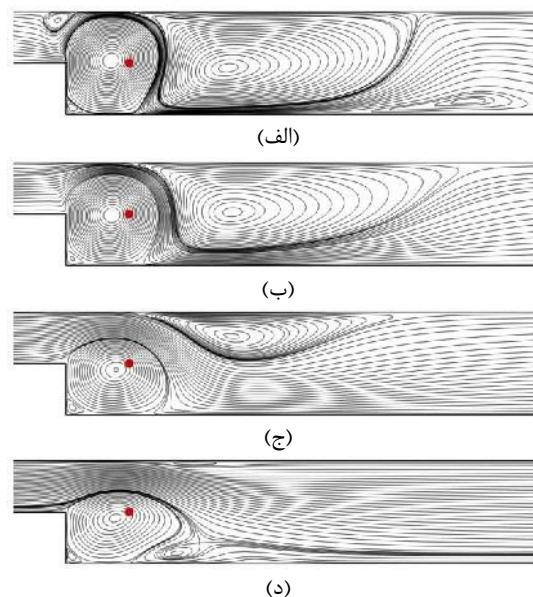
$$T_{ref} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (13)$$

همچنین ضریب اصطکاک در طول کانال از رابطه (۱۴) تعیین می‌شود:

$$f = \frac{\Delta p}{(L/D_h) \frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (14)$$

که Δp افت فشار استاتیکی در طول کانال فرض شده است.

به سمت الکتروود جمع‌کننده، گردابه‌ای حجیم‌تر در فضای بالای کانال ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش رینولدز جریان ورودی و کاهش اثرات محرک الکتروهیدرودینامیک بر جریان سیال، مشخص است که قدرت گردابه ایجاد شده کاهش می‌یابد.

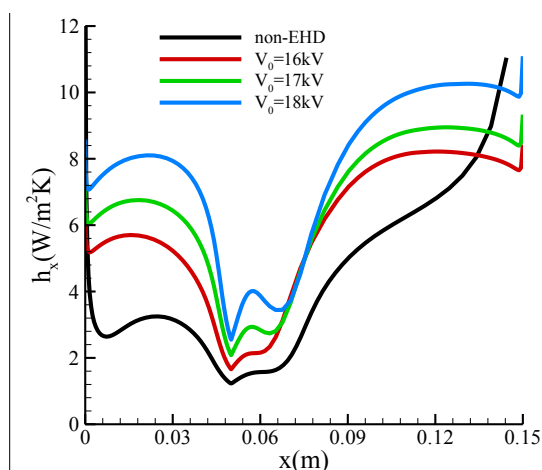


شکل ۱۳- خطوط جریان در حضور میدان الکتریکی (a=۶cm, $V_0=18kV$)

الف) Re=۳۴۲ (ب) Re=۷۵۳ (ج) Re=۲۱۲۲ (د) Re=۲۹۴۳

همچنین توزیع دما در اعداد رینولدز مختلف تحت تاثیر میدان الکتریکی در شکل ۱۴، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به دلیل وجود گردابه‌های بسیار قوی به خصوص در نزدیکی الکتروود تزریق‌کننده و پله، لایه مرزی حرارتی به شدت در این منطقه تحت تاثیر قرار گرفته است. با افزایش عدد رینولدز، جریان یا به عبارتی دیگر افزایش مومنتم جریان ورودی به کانال، میدان الکتریکی توان مقابله با این مومنتم را نداشته و با کوچکتر شدن قدرت گردابه‌ها، اثرات میدان الکتریکی کمتر و گرادیان دمایی در گوشه پله متمرکز می‌شود.

سیال اعمال نمی‌شود، از لبه پله، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد و تا گوشه پله این روند ادامه دارد؛ اما پس از این نقطه به دلیل تشکیل منطقه بازگردشی و چرخش سیال، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد؛ بنابراین کمینه ضریب انتقال حرارت در گوشه پایینی پله رخ داده است. این کمینه ضریب انتقال حرارت به دلیل ایجاد منطقه گردابه‌ای سرعت پایین ایجاد می‌شود که در شکل ۱۰ کاملاً مشخص است. از سویی دیگر، با اعمال میدان الکتریکی، نیروی خارجی به جریان سیال وارد شده، مطابق شکل ۱۵ الگوی جریان تغییر و ضریب انتقال حرارت به شدت تحت تاثیر باد کرنا قرار گرفته و افزایش می‌یابد. شایان ذکر است، علاوه بر برهم‌زدن الگوی جریان توسط نیروی خارجی اعمالی، میدان الکتریکی سبب انحراف بیشتر سیال خنک جریان اصلی کانال به سمت دیواره گرم می‌شود که این امر، تاثیر بسزایی در کاهش دمای دیواره‌ها دارد.

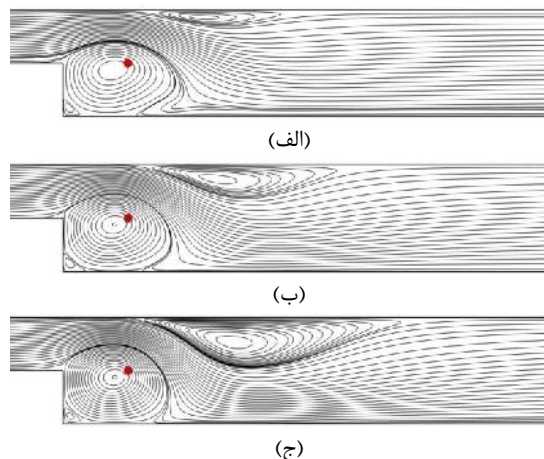


شکل ۱۶- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی روی پله پسرو با ولتاژهای مختلف ($a=6\text{cm}$, $Re=2122$)

با توجه به مطالب ذکر شده در خصوص تناسب اثرات پدیده الکتروهیدرودینامیک با تغییرات عدد رینولدز جریان ورودی و ولتاژ اعمالی، باید در نظر داشت که با افزایش عدد رینولدز، به نظر می‌رسد که جریان ثانویه کرنا از قدرت لازم برای انحراف جریان سیال برخوردار نمی‌باشد و توانایی مقابله با مومنتم جریان سیال ورودی را ندارد و در نتیجه، تولید گردابه‌های ضعیف‌تر، منجر به کاهش انتقال حرارت نسبت به رینولدزهای کمتر می‌شود؛ لذا برای جبران کمبود نیروی

۶-۴- تأثیر ولتاژ اعمالی بر جریان سیال و ضریب انتقال حرارت

در تحلیل پدیده الکتروهیدرودینامیک مادامی که ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد، جریان کرنا تخلیه شده بین الکتروود تزریق کننده و الکتروود جمع کننده نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، تأثیر میدان الکتریکی بر جریان سیال بیشتر می‌شود. با افزایش ولتاژ الکتریکی، 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. همان گونه که مشخص است، با افزایش ولتاژ اعمالی گردابه‌ای بزرگتر در منطقه جدایش ایجاد می‌شود؛ همچنین با افزایش ولتاژ اعمالی، گردابه ایجاد شده در فضای بالای کانال حجیم‌تر می‌شود. دلیل این امر، افزایش قدرت محرک الکتروهیدرودینامیک است که صفحه متصل به زمین به عنوان یک چاه عمل می‌کند؛ بنابراین سبب ایجاد گردابه در فضای بالای کانال می‌شود.



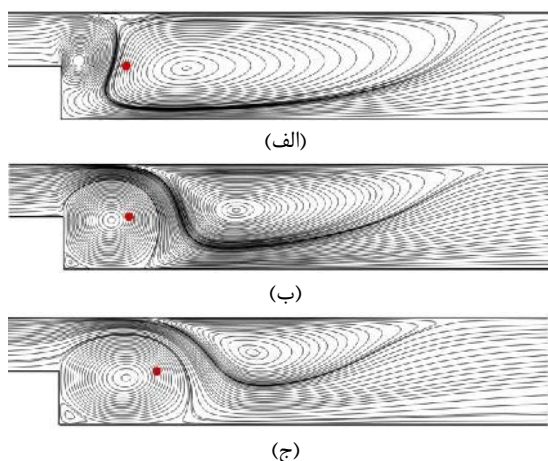
شکل ۱۵- خطوط جریان در حضور میدان الکتریکی در ولتاژهای مختلف ($a=6\text{cm}$, $Re=2122$)

(الف) $V_0=16\text{kV}$ (ب) $V_0=17\text{kV}$ (ج) $V_0=18\text{kV}$

در شکل ۱۶، ضریب انتقال حرارت موضعی در منطقه تحت شار حرارتی ثابت، نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در حالتی که میدان الکتریکی به جریان

شرایطی که فاصله‌های مختلفی بین الکتروود تزریق کننده و سطح پله در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، می‌توان اهمیت فاصله افقی بین الکتروود تزریق کننده تا الکتروود جمع کننده را بر اندازه گردابه‌های تولید شده و چگونگی تشکیل آنها مشاهده کرد.

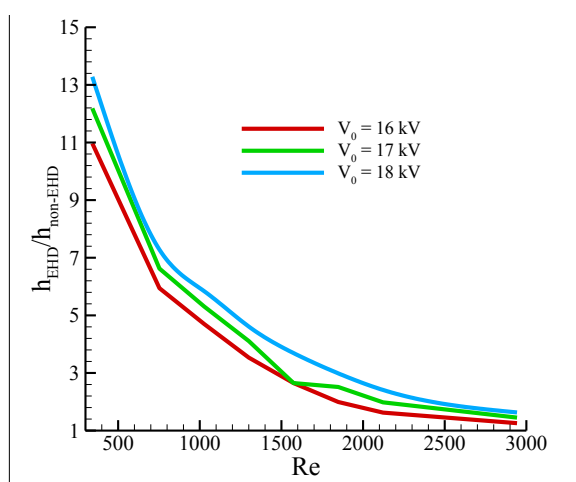
همان‌گونه که در شکل مشخص است، با افزایش فاصله الکتروود تزریق کننده از لبه پله، حجم گردابه در منطقه جدایش افزایش یافته و میزان انحرافی که توسط گردابه در مسیر جریان سیال اتفاق می‌افتد کمتر شده که موجب کاهش قدرت گردابه در منطقه انبساط می‌شود؛ در نتیجه گرادیان دمایی در قسمت متصل به زمین با دور شدن از لبه پله کاهش می‌یابد و بیشترین گرادیان، مربوط به کمترین فاصله از لبه پله به سبب وجود گردابه قوی‌تر و انحراف بیشتر جریان سیال است.



شکل ۱۸- خطوط جریان در کانال با اعمال $V_0=18\text{ kV}$ بر الکتروود تزریق کننده در فواصل مختلف ($Re=1027$)
(الف) $a=3\text{ cm}$ (ب) $a=6\text{ cm}$ (ج) $a=9\text{ cm}$

البته به منظور بررسی دقیق میزان تاثیر فاصله افقی، تغییرات نسبت ضریب انتقال حرارت متوسط در اعداد رینولدز مختلف، در شکل ۱۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۷ و مقایسه آن با شکل ۱۹، مشاهده می‌شود که کمترین فاصله از لبه پله، دارای بیشترین میزان انتقال حرارت است. ذکر این نکته ضروری است که اگرچه حجم گردابه‌ها با افزایش فاصله الکتروود تزریق کننده از لبه پله بیشتر می‌شود، اما قدرت گردابه‌ها و مقدار نفوذ سیال خنک

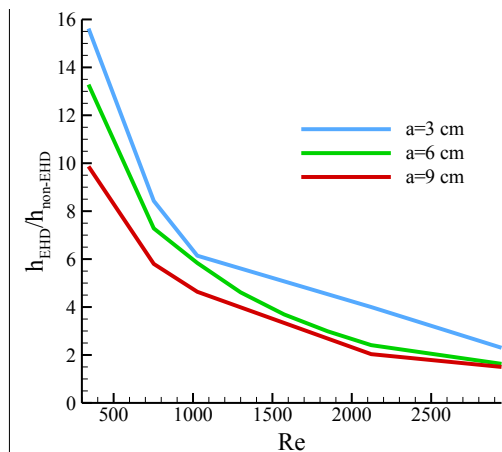
موردنظر و دستیابی به نتیجه‌ای مطلوب جهت افزایش اثرات میدان الکتریکی بر جریان، کنترل همزمان ولتاژ اعمالی و مومنتم جریان ورودی، می‌تواند موجب بهبود افزایش انتقال حرارت گردد. در این تحقیق، افزایش ضریب انتقال حرارت موضعی براساس نسبت ضریب انتقال حرارت متوسط در حضور میدان الکتریکی به حالتی تعریف می‌شود که میدان الکتریکی وجود ندارد. بر این اساس، شکل ۱۷ تغییرات این نسبت در رینولدزهای مختلف برای ولتاژهای متفاوت اعمالی بر میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. در این نمودار، به طور واضح مشخص است که افزایش انتقال حرارت در رینولدزهای کمتر و ولتاژهای بالاتر به مراتب بیشتر است.



شکل ۱۷- نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت در اعداد رینولدز و ولتاژهای اعمالی مختلف ($a=6\text{ cm}$)

۵-۶- تأثیر فاصله افقی الکتروود تزریق کننده از لبه پله بر الگوی جریان و ضریب انتقال حرارت

یکی از عوامل بسیار مهم در پدیده الکتروهدرودینامیک، فاصله الکتروود تزریق کننده از الکتروود جمع کننده است. از آنجایی که این فاصله در میدان یونیزاسیون سیال عامل و در نتیجه تولید جریان ثانویه قوی‌تر نقش بسزایی دارد؛ بنابراین بررسی تاثیر این فاصله، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. برای ارزیابی تأثیر فاصله الکتروود تزریق کننده از لبه پله پسرو بر افزایش انتقال حرارت و الگوی جریان، آرایش‌های مختلفی از نقطه‌نظر فاصله افقی در نظر گرفته شده، با یکدیگر مقایسه شده است. شکل ۱۸، خطوط جریان در

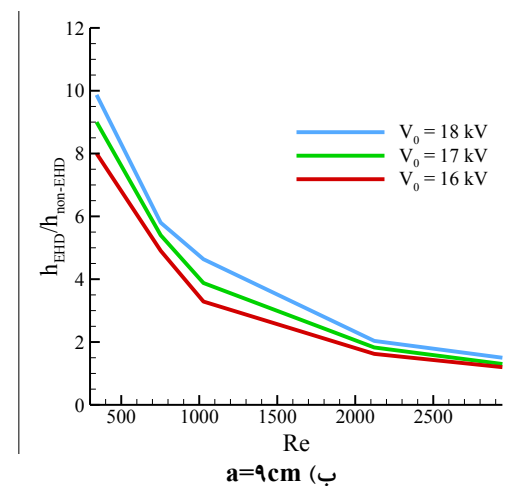
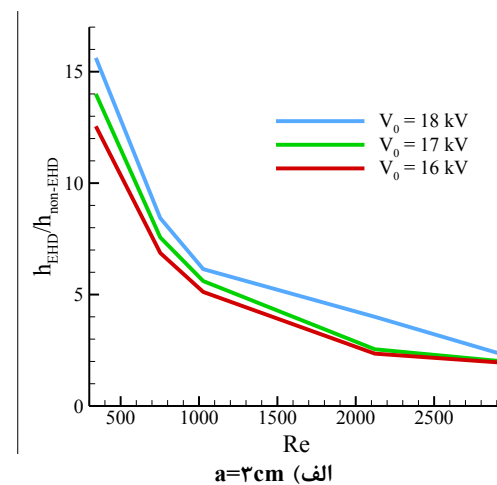


شکل ۲۰- نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت در اعداد رینولدز مختلف در $V_0=18\text{ kV}$

۷- تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر افت فشار جریان سیال

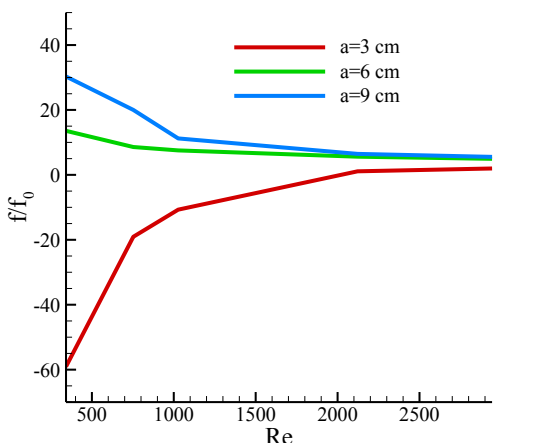
به منظور بررسی تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر افت فشار در یک کانال با پله پسرو، نسبت ضریب اصطکاک در اعداد رینولدزهای مختلف و در فواصل مختلف الکتروود تزریق کننده و ولتاژ اعمالی متفاوت از لبه پله بررسی شده است. همان گونه که در شکل ۲۱ مشاهده می شود، ضریب اصطکاک در حضور میدان الکتریکی نسبت به عدم حضور میدان الکتریکی، وابسته به عدد رینولدز، فاصله بین الکتروود تزریق کننده و جمع کننده و ولتاژ اعمالی است. همان گونه که به طور واضح مشخص است، در کمترین فاصله الکتروود تزریق کننده از الکتروود جمع کننده، با افزایش عدد رینولدز نسبت ضریب اصطکاک افزایش می یابد. همچنین با افزایش ولتاژ اعمالی در این فاصله، نسبت ضریب اصطکاک کاهش می یابد؛ اما با افزایش فاصله بین الکتروود تزریق کننده و جمع کننده با افزایش عدد رینولدز نسبت ضریب اصطکاک کاهش می یابد و به دلیل اینکه در اعداد رینولدز بالاتر تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک ناچیز می باشد، این نسبت به عدد یک میل می کند. همچنین در فاصله های بیشتر بین الکتروود تزریق کننده و جمع کننده، با افزایش ولتاژ اعمالی نسبت ضریب اصطکاک افزایش می یابد. شایان ذکر است که این تغییرات نوسانی برای نسبت ضریب اصطکاک به دلیل انحراف سیال و یا اعمال نیروی حجمی وارد شده بر جریان سیال است که در فاصله کمتر بین الکتروود تزریق کننده و

ورودی به سمت صفحات گرم کاهش می یابد؛ بنابراین انتقال حرارت با افزایش فاصله افقی الکتروود تزریق کننده از لبه پله کاهش می یابد. همچنین برای مقایسه بهتر نتایج حاضر، نسبت ضریب انتقال حرارت متوسط در ولتاژ ثابت ۱۸ کیلوولت در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، در یک عدد رینولدز ثابت با افزایش فاصله الکتروود تزریق کننده از لبه پله، نسبت ضریب انتقال حرارت متوسط کاهش می یابد.



شکل ۱۹- نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت در اعداد رینولدز و ولتاژهای اعمالی مختلف

همان گونه که مشاهده می‌شود، تغییرات نسبت افت فشار در همه فاصله‌ها با تغییرات عدد رینولدز، روند ثابتی را طی نمی‌کند و در کمترین فاصله نسبت ضریب اصطکاک به صورت صعودی است و با افزایش فاصله، این نسبت روند نزولی دارد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک عدد رینولدز ثابت، با افزایش فاصله الکتروود تزریق کننده از لبه پله نسبت ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.



شکل ۲۲- نسبت ضریب اصطکاک در فواصل مختلف الکتروود از پله در $V_0=18kV$

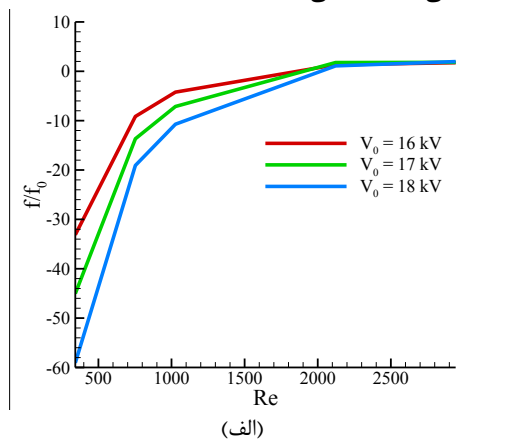
۸- جمع‌بندی

در مطالعه حاضر، مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت تحت تاثیر محرک الکتروهدرودینامیکی به صورت عددی، مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی بررسی تاثیر اعمال میدان الکتریکی بر میدان جریان و همچنین بررسی تاثیر پارامترهای مختلف آن بر ضریب انتقال حرارت است. مهمترین نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشد:

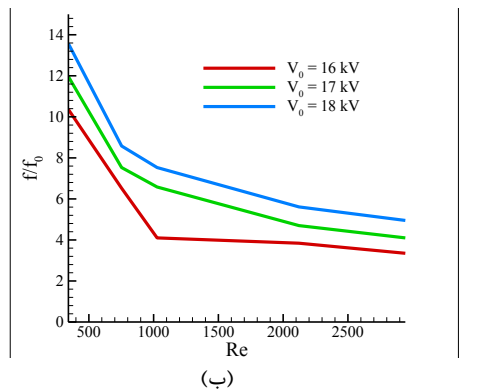
با افزایش عدد رینولدز، جریان ثانویه کرونا از قدرت لازم برای انحراف جریان سیال برخوردار نمی‌باشد و توانایی مقابله با مومنتم جریان ورودی را ندارد و در نتیجه، تولید گردابه‌های ضعیف‌تر، منجر به کاهش انتقال حرارت نسبت به رینولدزهای پایین‌تر می‌شود.

اگر ولتاژ اعمالی بر الکتروود تزریق کننده 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

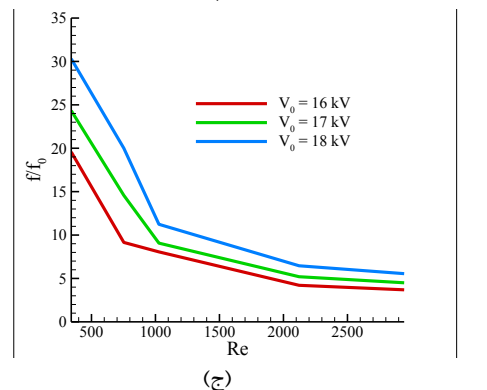
جمع کننده نیروی الکتروهدرودینامیک باعث افزایش فشار در خروجی کانال نیز می‌گردد به همین دلیل، نسبت ضریب اصطکاک عددی منفی به دست آمده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲۱- نسبت ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز و ولتاژهای اعمالی مختلف

(الف) $a=3cm$ (ب) $a=6cm$ (ج) $a=9cm$

همچنین برای بررسی بیشتر نتایج افت فشار، نسبت افت فشار در فاصله‌های مختلف الکتروود تزریق کننده از لبه پله در ولتاژ ۱۸ کیلوولت در شکل ۲۲ نشان داده شده است.

F/m	ضریب گذردهی الکتریکی،	ε	هیدرودینامیکی، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد.
C/m ³	چگالی بار الکتریکی،	ρ_c	تغییر در مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده، باعث
kg/m.s	لزجت دینامیکی،	μ	تغییر در ضریب انتقال حرارت می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش فاصله قرارگیری الکتروود تزریق کننده از لبه پله، میزان ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

مراجع

[1] LE H, Moin P, KIM K (1997) Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step. *J Fluid Mech* 330: 349-374.

[2] Nie JH, Armaly BF (2002) Three-dimensional convective flow adjacent to backward-facing step-effects of step height. *Int. J. Heat Mass Transfer* 45: 2431-2438.

[3] Armaly BF, Li A, Nie JH (2003) Measurements in three-dimensional laminar separated flow. *Int. J. Heat Mass Transfer* 46: 3573-3582.

[4] Erturk E (2008) Numerical solutions of 2-D steady incompressible flow over a backward-facing step. *Comput. & Fluids* 35: 633-655.

[5] Mushatet KS (2011) Simulation of turbulent flow and heat transfer over a backward-facing step with ribs turbulators. *Thermal Science* 15(1): 245-255.

[6] Bergles AE, Nirmalan V, Junkhan JH, Webb RL (1983) Bibliography of augmentation of convective heat and mass transfer. part 2, Report HTL-31, ISU-ERI-Ames-84221, Heat Transfer Laboratory, Iowa State University, Ames, IA.

[7] Bergles AE, Jensen MK, Somerscales EFC, Manglik RM (1991) Literature review of heat transfer enhancement technology for heat exchanges in gas-fired applications. Report GRI 91-0146, Gas Research Institute, Chicago.

[8] Bergles AE, Jensen MK, Shome B (1995) Bibliography on enhancement of convective heat and mass transfer. Report HTL-23, Heat transfer laboratory, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.

[9] Kasayapanand N, Kiatsiriroat T (2005) EHD enhanced heat transfer in wavy channel. *Int Commun Heat Mass* 32: 809-821

[10] Tathiri Gh, Pouryoussefi Gh, Doostmahmoudi A, Mirzaei M (2014) Experimental investigation of the effect of dielectric barrier on induced velocity of quiescent air boundary layer with comparison of corona wind and AC-DC DBD plasma. *Jourbal of Solid and Fluid Mechanics* 3(4):103-110.

[11] Deylami HM, Amanifard N, Dolati F, Kouhikamali R, Mostajiri K (2013) Numerical investigation of electrohydrodynamic effects on the airflow through corrugated channels. Part C: *J Mech Eng Sci* 227(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.

در پدیده الکتروهیدرودینامیک، حجم و قدرت گردابه‌های ایجاد شده کاملاً متاثر از پارامترهای میدان الکتریکی می‌باشند؛ همچنین با افزایش تاثیر میدان الکتریکی بر جریان سیال حجم گردابه ایجاد شده در بالای کانال افزایش می‌یابد که این امر، باعث انحراف بیشتر سیال به سمت صفحه متصل به زمین و دارای شار حرارتی ثابت می‌شود؛ در نتیجه افزایش انتقال حرارت داخل کانال به تولید گردابه در فضای بالای کانال نیز وابسته است.

میزان افزایش افت فشار در حضور میدان الکتریکی به نسبت افت فشار بدون حضور میدان الکتریکی کاملاً وابسته به فاصله الکتروود تزریق کننده و جمع کننده، ولتاژ اعمالی و عدد رینولدز است.

۹- فهرست علائم

D_h	قطر هیدرولیکی،	m
E	میدان الکتریکی،	V/m
f	ضریب افت اصطکاکی	
f_e	نیروی الکتروهیدرودینامیکی،	V/m ³
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی،	W/m ² .k
H	ارتفاع کانال،	m
J	چگالی جریان الکتریکی،	A/m ²
k	انرژی جنبشی آشفتگی،	m ² /s ²
n	متغیر عمود بر سطح	
q''	شار حرارتی،	W/m ²
r	شعاع الکتروود تزریق کننده،	cm
Re	عدد رینولدز	
T	دما،	K
T_{ref}	دما،	K
V	ولتاژ،	V
علائم یونانی		
β	یون پذیری،	m ² /v.s

- [15] FLUENT 6.3 user's guide, Fluent Inc., Lebanon, NH (2006).
- [16] Adamiak K, Atten P (2004) Simulation of corona discharge in point-plane configuration. *J Electrostat* 61: 85-98.
- [17] 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.
- [13] Alamgholilou, Esmaeilzadeh 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.
- [14] 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.