



## تحلیل عددی تأثیر الکتروود جمع‌کننده سیمی بر میدان جریان و انتقال حرارت تحت محرک الکتروهیدرودینامیک

سید سجاد تقوی فدکی<sup>۱</sup>، نیما امانی‌فرد<sup>۲</sup>، حامد محدث دیلمی<sup>۳\*</sup>، فرید دولتی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده فنی، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، رودسر

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری دانشکده فنی، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۱/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

### چکیده

در مطالعه حاضر، به بررسی عددی میدان جریان و دما تحت تأثیر میدان الکتریکی در یک کانال مسطح در حضور الکتروود جمع‌کننده سیمی و تحت شرایط دو بعدی، آشفته، غیرقابل تراکم و پایا با روش حجم محدود پرداخته شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک شبکه سازمان‌یافته، غیریکنواخت و چهار وجهی، توسط مدل آشفتگی Standard K-ε انجام شده است. همچنین بررسی پارامترهای مختلف از قبیل، شعاع الکتروود جمع‌کننده، ولتاژ اعمالی، عدد رینولدز و فاصله عمودی مابین الکتروودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده و تأثیر آن‌ها بر الگوی جریان و ضریب انتقال حرارت، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی از تطابق قابل قبولی برخوردار است. نتایج تحلیل عددی، حاکی از آن است که در شعاع الکتروود جمع‌کننده بزرگتر، رینولدزهای پایین‌تر، ولتاژهای بالاتر و همچنین در فاصله‌های کمتر الکتروودها نسبت به یکدیگر، پدیده الکتروهیدرودینامیک تأثیر به‌سزایی در افزایش انتقال حرارت دارد. در واقع وجود محرک الکتروهیدرودینامیک به عنوان تولیدکننده جریان ثانویه، اثرات مهمی را بر ساختارهای گردابه‌ای میدان جریان و متعاقباً بر انتقال حرارت جابجایی اجباری، از خود بر جای می‌گذارد.

**کلمات کلیدی:** الکتروهیدرودینامیک؛ الکتروود جمع‌کننده؛ انتقال حرارت؛ بررسی عددی.

## Numerical Investigation of Collecting Wire Electrode Effect upon Flow Field and Heat Transfer with Electro-hydrodynamic Actuator

S. S. Taghavi Fadaki<sup>1</sup>, N. Amanifard<sup>2</sup>, H. M. Deylami<sup>3\*</sup>, and F. Dolati<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Dep. of Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran.

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

<sup>4</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran.

### Abstract

In this work, the flow and temperature fields affected by an electric field in the presence of a wire-collecting electrode are numerically studied for the two-dimensional, incompressible, turbulent, and steady-flow conditions by the finite volume approach. This computational methodology includes the use of a structured non-uniform quadrilateral grid, and the standard K-ε model is adopted as the turbulence model. The computed results are compared with the experimental data; they agree very well. Then the effects of different parameters such as the collecting electrode radius, applied voltage, Reynolds number, and distance between emitting and collecting electrodes on the flow pattern and heat transfer coefficient are evaluated. The numerical results obtained show that the influence of the electro-hydrodynamic phenomenon on the heat transfer enhancement increases with the radius of the grounded electrode and applied voltage but decreases when the Reynolds number and the distance between electrodes are augmented. The results obtained indicate that the electro-hydrodynamic actuator acts as a generator of secondary flow, and these vortices are used to enhance the forced convection heat transfer.

**Keywords:** Electrohydrodynamic; Collecting Electrode; Heat Transfer; Numerical Investigation.

## ۱- مقدمه

امروزه کنترل جریان سیال و در نتیجه افزایش انتقال حرارت تحت شرایط مختلف، از جمله اهداف مورد نظر در اکثر صنایع به شمار می‌رود. برای این منظور، تاکنون روش‌های گوناگونی استفاده شده که به سه دسته کلی غیرفعال، فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند. در روش‌های غیرفعال مانند مولدهای گردابه، از نیروی‌های خارجی به منظور کنترل جریان استفاده نمی‌شود؛ اما در روش‌های فعال مانند، لرزش سطح و اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، نیروهای خارجی برای کنترل جریان و افزایش انتقال حرارت، مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ همچنین در روش‌های ترکیبی از هر دو روش برای این منظور استفاده 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. در این روش اعمال میدان الکتریکی ولتاژ بالا، موجب یونیزاسیون سیال دی‌الکتریک اطراف الکتروود تزیق‌کننده می‌شود. یون‌های همنام با الکتروود تزیق‌کننده در اثر نیروهای الکتریکی به سمت الکتروود جمع‌کننده حرکت کرده، با انتقال مومنتم به ذرات خنثی سیال در اثر برخورد، جریان ثانویه‌ای با نام باد کرونا تولید می‌کنند که در این شرایط، تقابل میدان‌های جریان، دما و میدان الکتریکی را پدیده الکتروودینامیک<sup>۱</sup> می‌نامند. در این پدیده با انتقال مومنتم به جریان اولیه سیال و برهم زدن الگوی جریان، لایه مرزی هیدروودینامیکی و حرارتی تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ در نتیجه با کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی و همچنین آشفتگی جریان در نواحی دارای شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. جریان کرونا بر اساس نوع بار یون‌های جریان‌یافته، به باد کرونای مثبت و منفی تقسیم می‌شود. تخلیه کرونای منفی برخلاف کرونای مثبت، به طور ناپیوسته در طول الکتروود تزیق‌کننده صورت می‌پذیرد. پایداری قطب مثبت نسبت به قطب منفی، بیشتر و مصرف انرژی الکتریکی قطب مثبت نسبت به قطب منفی، کمتر است. همچنین تخلیه کرونای منفی، بی‌نظمی‌هایی در ایجاد نیروی

الکتروودینامیک ایجاد می‌کند. در اثر یونیزاسیون و رانده شدن یون‌ها به سمت الکتروود جمع‌کننده حاصل از برقراری اختلاف ولتاژ الکتریکی بین دو الکتروود، 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.

الکتروودینامیک، پدیده‌ای است که در چند دهه گذشته مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته و پژوهش‌های آنها حاکی از پتانسیل 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]. در صنعت هوافضا، محرک‌های الکتروودینامیک جهت کاهش نیروی بازدارندگی هواپیما و یا پایداری جریان هوا استفاده می‌شوند [۲ و ۳]. در صنعت غذایی نیز، جریان کرونا تبدیل به روشی نوین به منظور بهبود فرآیند خشک کردن مواد متخلخل شده است [۴ و ۵].

نیاز روزافزون به سیستم‌های حرارتی کوچک‌تر و با صرفه‌تر در صنایع مختلف مانند، صنایع غذایی، تهویه مطبوع و انرژی‌های نو، بهبود انتقال حرارت را امری ضروری ساخته، به طوری که محققان و طراحان تلاش زیادی را صرف آن کرده‌اند. بهبود انتقال حرارت حاصل از تقابل میدان‌های الکتریکی، دما و جریان هوای آرام گذرنده از عرض دسته لوله توسط کاسایاپاناند<sup>۲</sup> و همکاران [۶] مطالعه شده است. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از آن است که بهبود ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز و فاصله مابین الکتروودها و سطح لوله‌ها، رابطه معکوسی داشته و به آرایش الکتروودی، تعداد الکتروودها و تعداد ردیف لوله‌ها وابسته است. در مطالعه‌ای دیگر کاسایاپاناند و کیاتسیریرات<sup>۳</sup> [۷]، افزایش انتقال حرارت جابجایی با استفاده از روش الکتروودینامیک در یک کانال موجی شکل را به صورت عددی بررسی کردند. آنها با تغییر تعداد و فاصله الکتروودها ضمن یافتن آرایش بهینه

<sup>2</sup> Kasayapanand<sup>3</sup> Kiatsiriroat<sup>1</sup> Electrohydrodynamics (EHD)

جت کرونا است. در پژوهشی دیگر لاکه و ملکی [۱۲] به بررسی تجربی و عددی تقابل مابین جریان آرام و میدان جریان ثانویه حاصل از جفت باریکه‌های نوار هادی به عنوان الکترودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده و بهبود انتقال حرارت حاصله در ناحیه کاملاً توسعه‌یافته بین صفحات موازی پرداخته‌اند. آنها دریافتند که انطباق و برهم‌نهنش جت‌های کرونا و جریان محوری، تولید اثری چرخشی کرده که موجب تغییر میدان دما و بهبود انتقال حرارت در ناحیه توسعه‌یافته جریان می‌شود. همچنین عدد ناسلت برای جریان داخلی آرام در پیکربندی صفحات موازی برابر با  $4/86$  بوده که با اعمال میدان الکتریکی به  $13/26$  معادل با  $173\%$  بهبود انتقال حرارت، به ازای ولتاژ  $24 \text{ kV}$  افزایش می‌یابد. تطهیری و همکاران [۱۳]، به صورت تجربی اثرات وجود مانع دی‌الکتریک، در سرعت القایی لایه مرزی در هوای ساکن، در باد کرونی 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 و همکاران [۱۴]، انتقال حرارت در کانال مسطح را در حضور پدیده الکتروهایدرودینامیک مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش ولتاژ اعمالی و کاهش شعاع الکترودهای تزریق‌کننده، در اعداد رینولدز پایین غلبه جریان ثانویه حاصل از این پدیده افزایش یافته، در نتیجه انتقال حرارت بهبود می‌یابد. همچنین انتخاب آرایش مناسب الکترودها به همراه فاصله مناسب مابین آنها، تأثیرات قابل توجهی بر جریان و انتقال حرارت گذاشته است. تحقیقی در زمینه تأثیر آرایش الکترودهای سیمی تزریق‌کننده و جمع‌کننده بر جریان حاصل از میدان الکتریکی و بهبود انتقال حرارت در نمونه متخلخل اشباع شده مستقر در کف کانال، توسط آیوتایا<sup>۳</sup> و همکاران [۱۵] انجام گرفته است. نتایج عددی آنها نشان‌دهنده شدت بیشتر جریان چرخشی با افزایش ولتاژ الکتریکی بوده، به ازای فواصل کم بین الکترودها، جریان چرخشی دارای ابعاد بزرگتری است. همچنین آنها نشان دادند

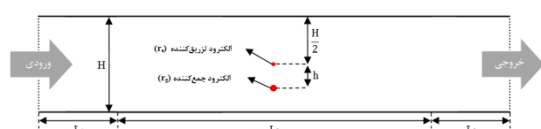
جهت افزایش انتقال حرارت، مشاهده کردند که کاهش عدد رینولدز، افزایش تعداد و دامنه نوسان‌های دیواره و افزایش دمای دیواره موجی‌شکل، عوامل مؤثری در استفاده از این روش می‌باشند. گو<sup>۱</sup> و همکاران [۸]، در مطالعه‌ای تجربی تغییر شکل لایه مرزی جریان توده‌ای روی صفحه‌ای مسطح را با قرار دادن الکترودهای سیمی تزریق‌کننده و نوار مسی به عنوان جمع‌کننده بررسی کرده‌اند. آنها مشاهده کردند که رابطه‌ای خطی مابین ولتاژ و ریشه دوم جریان الکتریکی و همچنین مابین ضریب انتقال حرارت حاصل از باد یونی و ریشه چهارم جریان الکتریکی برقرار است که مشاهدات قبلی محققان و روابط تحلیلی را اثبات می‌کند. همچنین آنها افزایش بیش از  $20\%$  در ضریب انتقال حرارت موضعی ناشی از باد یونی با توان ورودی  $67/6 \text{ mW}$  و جریان کرونی  $1 \mu\text{A}$  که دارای بیشینه مقدار در مجاورت الکترودهای سیمی را اندازه‌گیری کردند. احمدو<sup>۲</sup> و هاوت [۹] انتقال حرارت در کانال را تحت تأثیر پدیده الکتروهایدرودینامیک بررسی نمودند که نتیجه این تحقیق حاکی از آن است که در رینولدزهای پایین تأثیر الکتروهایدرودینامیک بیشتر است و در حالتی که تعداد الکترودها افزایش می‌یابد، فاصله الکترودها نیز به منظور افزایش انتقال حرارت دارای اهمیت می‌شود. بهبود انتقال حرارت از منابع حرارتی سیلندری مستقر در کف کانال، تحت تأثیر محرک الکتروهایدرودینامیک توسط شکوری‌پور و اسماعیل‌زاده [۱۰] بررسی شده است. در این آزمایشات، مشاهده الگوهای جریان در حضور محرک الکتروهایدرودینامیک نشان‌دهنده زوال نواحی سیرکولاسیون یا مرده در پشت شیارها و هدایت جریان هوا بر روی شیارها است. لاکه و ملکی [۱۱] پیکربندی متشکل از الکترودهای سیمی قرار گرفته در خارج از مرکز یک لوله که منجر به ایجاد یک جت موضعی در جهت خروج از مرکز الکترودها شده را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آنها حاکی از این بود که افزایش پتانسیل الکتریکی منجر به تشکیل جت‌های کرونی قوی‌تری می‌شود که نتیجه این عمل افزایش نسبی بهبود انتقال حرارت از  $4/2-8/7$  برابر نسبت به جابجایی طبیعی به ازای پتانسیل‌های الکتریکی  $7/5-10/5 \text{ kV}$  در نقطه برخورد

<sup>۱</sup> Go<sup>۲</sup> Ahmedou and Havet<sup>۳</sup> Ayuttaya

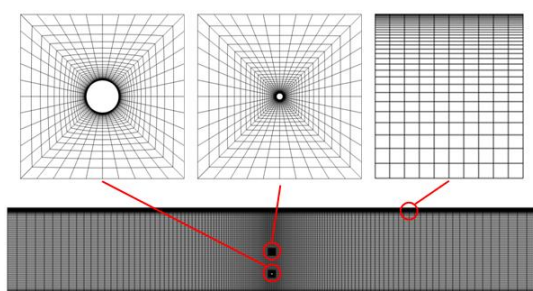
طراحی مدل هندسی و تولید شبکه به کمک نرم افزار گمبیت نسخه ۲.۳.۲۱۶ انجام گرفته، شبکه ایجاد شده به صورت سازمان یافته، غیریکنواخت و چهارضلعی است. به منظور افزایش دقت محاسبات، مطابق شکل ۲ در مکان‌های نزدیک دیواره و یا مکان‌هایی که گرادیان شدید الکتریکی یا دمایی وجود دارد، تراکم شبکه‌بندی نسبت به دیگر نقاط بیشتر است. همچنین ناحیه محاسباتی به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی شده است تا کنترل بهتری روی شبکه تولیدی صورت گیرد.

جدول ۱- مشخصات هندسی کانال

پارامتر	مقدار
H (cm)	۱۰
L <sub>1</sub> (cm)	۳۰
L <sub>2</sub> (cm)	۶۰
L <sub>3</sub> (cm)	۵۰
r <sub>e</sub> (mm)	۰/۲
r <sub>g</sub> (mm)	۱، ۰/۵، ۰/۲
h (cm)	۳/۷۵، ۲/۵، ۱/۲۵
V <sub>0</sub> (kV)	۲۴، ۲۲، ۲۰



شکل ۱- هندسه مطالعاتی



شکل ۲- شبکه محاسباتی

### ۳- روش حل عددی

جهت مدل‌سازی عددی پدیده الکتروهایدرودینامیک در جریان سیال، می‌بایست نیروی حاصل از اعمال میدان الکتریکی، در معادلات حاکم بر جریان سیال به عنوان نیروی

که با حضور چند الکتروود جمع‌کننده می‌توان نیروی حجمی الکتریکی بیشتری نسبت به تک الکتروود ایجاد کرده که موجب گسترش جریان چرخشی بر سطح نمونه و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شود. مقالو و همکاران [۱۶]، اثر میدان الکتریکی بر بهبود انتقال حرارت و افت فشار در کانال کوچکی را به ازای اعداد رینولدز متناظر با جریان آرام سیال مایع، مطالعه کرده‌اند. آزمایشات نشان دادند که با وجود مؤثرتر بودن حضور میدان الکتریکی در اعداد رینولدز پایین، با افزایش شدت میدان الکتریکی، عملکرد خنک‌کاری به ازای تمامی اعداد رینولدز بهبود می‌یابد. همچنین نتایج آنها حاکی از آن بود که ملاک ارزیابی عملکرد<sup>۱</sup> محاسبه شده با اعمال روش الکتروهایدرودینامیک، بالاتر از یک بوده که در بیشتر روش‌های بهبود انتقال حرارت این گونه نیست. این نشان از بالاتر بودن میزان بهبود انتقال حرارت نسبت به افت فشار است که از جمله فواید این روش به شمار می‌رود.

براساس گزارشات فوق، عملکرد تخلیه کرونا در ایجاد جریان ثانویه و تأثیر آن بر انتقال حرارت به طور مستقیم به پیکربندی تجهیزات و آرایش الکتروودی وابسته است. با توجه به اینکه در اکثر مطالعات صورت گرفته دیواره کانال به صورت یکنواخت به عنوان الکتروود جمع‌کننده در نظر گرفته شده است، هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی عددی استفاده از تک الکتروود جمع‌کننده سیمی به همراه پارامترهای شعاع الکتروود جمع‌کننده، فاصله عمودی آن، ولتاژ اعمالی با قطب مثبت و عدد رینولدز جهت دستیابی به بهبود موضعی میدان جریان و انتقال حرارت داخل کانال است.

### ۲- هندسه مسئله و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

مطابق شکل ۱، هندسه مسأله به صورت یک کانال شامل دو صفحه تخت و موازی است که الکتروود تزریق‌کننده در مرکز کانال قرار می‌گیرد. همچنین الکتروود سیمی جمع‌کننده در فاصله h از الکتروود تزریق‌کننده قرار می‌گیرد. به منظور از بین بردن تأثیر مرزهای ورودی و خروجی، ناحیه محاسباتی طولانی‌تر از ناحیه فیزیکی است. مشخصات هندسی کانال در جدول ۱ ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Performance Evaluation Criterion (PEC)

معادلات مشتقات پاره‌ای جزئی و تعیین پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی، از UDF فلونت<sup>۱</sup> بر پایه برنامه به زبان C استفاده شده، نیروی الکتریکی به دست آمده و به معادلات مومنتم اضافه می‌شود. حل عددی معادلات (۲) تا (۵) با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلونت نسخه ۶.۳.۲۶، براساس حجم محدود و توسط حل‌کننده بر پایه فشار انجام 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  $10^{-6}$  است. تمامی محاسبات با استفاده از یک سیستم رایانه ۶۴-bit، دارای پردازشگر Intel Core i7 2.9 GHz و حافظه ۴ Gb، به صورت سریال انجام شده و زمان مورد نیاز جهت انجام محاسبات در هر مرحله حدود ۷ تا ۱۲ ساعت برای میدان الکتریکی و حدود ۱/۵ تا ۳ ساعت برای میدان‌های جریان و دما است که متناسب با هندسه حل و پارامترهای مورد نظر متغیر است. به منظور بررسی عدم وابستگی حل عددی به شبکه ایجاد شده، ضریب انتقال حرارت موضعی دیواره پایین کانال در حضور میدان الکتریکی برای شبکه‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، ضریب انتقال حرارت موضعی در شبکه‌هایی با تعداد سلول‌های ۳۳۶۸۰ و ۴۹۱۴۰ تقریباً یکسان است؛ بنابراین برای کاهش تعداد محاسبات در تحلیل عددی، از شبکه با تعداد سلول ۳۳۶۸۰ بهره گرفته شده است. همچنین برای دیگر شرایط نیز، استقلال شبکه بررسی شده است.

#### ۴- خواص ترموفیزیکی و شرایط مرزی

هوا به عنوان سیال عامل، به صورت تراکم‌ناپذیر دارای خواص ترموفیزیکی ثابت است و با دمای ۳۰۰ K و شدت آشفتگی ۵٪ وارد کانال می‌شود. صفحات کانال و الکترودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده به عنوان دیوار فرض شده، شرط عدم لغزش برای آن‌ها اعمال گردیده است. همچنین دیواره

حجمی در نظر گرفته شود. نیروی حجمی الکتروهدرودینامیک به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

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

مؤلفه‌های دوم و سوم رابطه (۱) به ترتیب، به دلیل ضریب گذردهی ثابت و تغییرات ناچیز پخش میدان الکتریکی، ناچیز در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین تنها مؤلفه  $\rho_c E$  باقی می‌ماند که به نیروی الکتریکی کولمب مشهور است.

جهت مدل‌سازی آشفتگی، مدل دومعادله‌ای k-ε بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس (RANS) به کار رفته است. دستگاه معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی برای جریان تحت شرایط دوبعدی، تراکم‌ناپذیر، پایا، لزج و تک‌فاز عبارت از روابط (۲-۵) است [۱۷]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + (\mu + \mu_t) \nabla^2 u + f_i \quad (3)$$

$$\mu_t / \rho = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (4)$$

$$u \cdot \nabla T = \nabla \cdot ((\alpha + \alpha_t) \nabla T) \quad (5)$$

به منظور تعیین نیروی حجمی ( $f_i$ ) در معادلات مومنتم، از معادلات حاکم بر میدان الکتریکی بهره برده می‌شود. فرم کلی معادله پتانسیل الکتریکی و قانون بقای بار الکتریکی به صورت روابط (۶-۷) است [۱۸]:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0 \quad (7)$$

که در این رابطه  $J$  به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$J = \rho_c \beta E + \rho_c u + \sigma E \quad (8)$$

سه عبارت سمت راست معادله (۸) به ترتیب، تحرک یونی، جابجایی و هدایت الکتریکی نامیده می‌شوند. به دلیل بالاتر بودن مرتبه بزرگی تحرک یونی نسبت به جابجایی و هدایت الکتریکی، از این عبارتها صرف نظر می‌شود. با این فرضیات و در نظر گرفتن رابطه مابین پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی ( $E = -\nabla V$ )، معادله (۸) به صورت رابطه (۹) ساده می‌شود:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (-\beta \rho_c \nabla V) = 0 \quad (9)$$

به این ترتیب معادلات (۶) و (۹)، معادلات اساسی حاکم بر میدان الکتریکی با استفاده از اصول الکترومغناطیس کلاسیک در نظر گرفته شده‌اند. جهت حل همزمان این

<sup>۱</sup> Fluent

اندازه میدان الکتریکی در الکتروود تزریق‌کننده محاسبه و در صورت عدم تطابق آن با مقدار رابطه پیک حدس دیگری برای بار الکتریکی انتخاب می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که اندازه میدان الکتریکی در محاسبات عددی با رابطه پیک تفاوت ناچیزی داشته باشد.

### ۵- بررسی نتایج

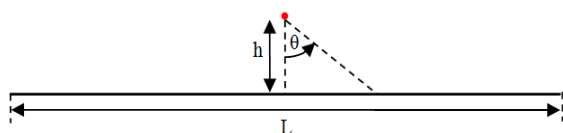
ضرایب انتقال حرارت موضعی و متوسط و همچنین دمایی مرجع به صورت روابط (۱۱-۱۳) بیان می‌شوند:

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

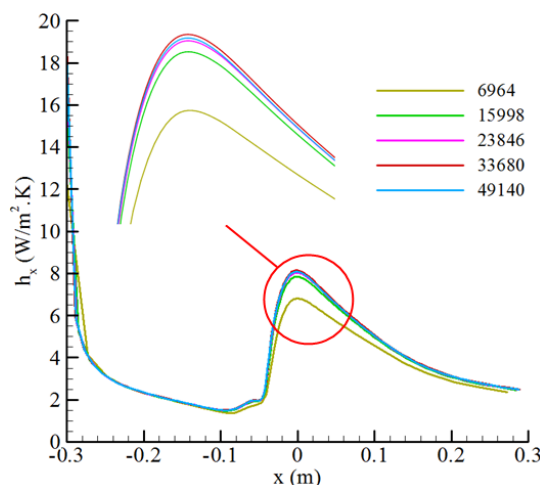
$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (12)$$

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

در این رابطه  $q''$  برابر با  $100 \text{ W/m}^2$  است. به منظور اعتبارسنجی تحلیل عددی حاضر و تعیین دقیق نیروی حجمی کولمب، میدان الکتریکی حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی اوسالا و زبوج [۲۰] مقایسه شده است. آن‌ها به صورت تجربی توزیع میدان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی روی یک صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند (شکل ۴). در این مطالعه، طول صفحه  $L = 0.16 \text{ m}$  و فاصله مابین الکتروودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده  $0.05 \text{ m}$  است.  $h$  در نظر گرفته شده است. همچنین  $\theta$  زاویه بین خط عمود بر صفحه پایینی از الکتروود تزریق‌کننده و خط واصل بین الکتروود تزریق‌کننده به مکانی از صفحه جمع‌کننده است. در شکل‌های ۵ و ۶، نتایج عددی مطالعه حاضر با نتایج تجربی مقایسه و همخوانی خوبی مشاهده گردیده است.



شکل ۴- نمایی دوبعدی از یک صفحه تخت و الکتروود تزریق‌کننده در بالای آن



شکل ۳- بررسی استقلال شبکه

$$(V_0 = 20 \text{ kV}, Re = 1027, h = 2/5 \text{ cm}, r_g = 1 \text{ mm})$$

پایین کانال تحت شار حرارتی یکنواخت است. همچنین هوا با فرض فشار نسبی صفر از کانال خارج می‌شود. به الکتروود تزریق‌کننده، ولتاژ مستقیم و مثبت اعمال شده است. شرایط مرزی میدان الکتریکی، جریان و دما در مرزهای دامنه محاسباتی در جدول ۲ مشخص شده است.

تعیین شرط مرزی بار الکتریکی روی الکتروود تزریق‌کننده آسان نیست و از طریق سعی و خطا قابل محاسبه است. بر این اساس، از فرضیه کاپتزووف<sup>۱</sup> و قانون پیک<sup>۲</sup> برای این منظور استفاده شده است.

فرضیه کاپتزووف بیان می‌کند که پس از آستانه تخلیه کرونا، میدان الکتریکی با افزایش ولتاژ ثابت می‌ماند و از رابطه تجربی پیک قابل محاسبه است. این رابطه به فرم رابطه (۱۰) بیان می‌شود [۱۹]:

$$E_0 = 3.1 \times 10^6 \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r_e}}\right) \quad (10)$$

که در محاسبات، شعاع الکتروود تزریق‌کننده برحسب سانتی‌متر بیان می‌شود.

قانون پیک در تحلیل عددی به طور غیرمستقیم در یافتن مقدار بار الکتریکی قابل استفاده است. در این روش، بار الکتریکی روی الکتروود تزریق‌کننده حدس زده شده، سپس

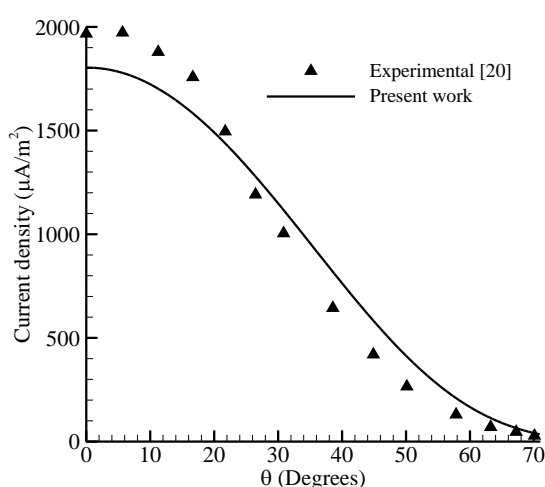
<sup>۱</sup> Kaptsov Theory

<sup>۲</sup> Peek's Law

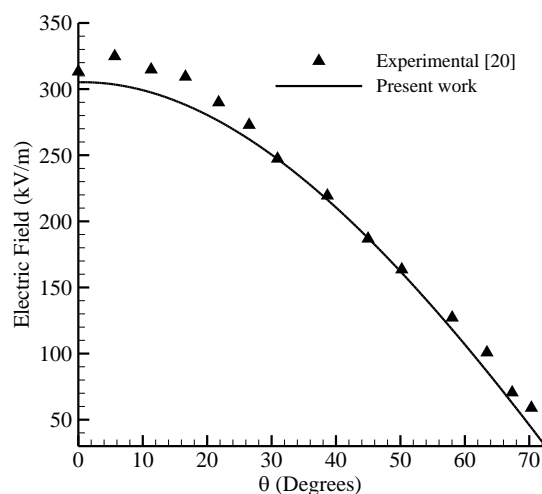
<sup>۳</sup> Oussalah and Zebboudj

جدول ۲- شرایط مرزی میدان جریان و میدان الکتریکی

مرز	سرعت	پتانسیل الکتریکی	چگالی بار الکتریکی	دما
ورودی	$u = U_0$	$\partial V/\partial x = 0$	$\partial \rho_c/\partial x = 0$	$T = T_{in}$
خروجی	$\partial u/\partial x = 0$	$\partial V/\partial x = 0$	$\partial \rho_c/\partial x = 0$	$\partial T/\partial x = 0$
الکتروود تزریق کننده	$u = 0$	$V = V_0$	Peek's value	$\partial T/\partial n = 0$
الکتروود جمع کننده	$u = 0$	$V = 0$	$\partial \rho_c/\partial n = 0$	$\partial T/\partial n = 0$
صفحه بالایی	$u = 0$	$\partial V/\partial y = 0$	$\partial \rho_c/\partial y = 0$	$\partial T/\partial y = 0$
صفحه پایینی	$u = 0$	$\partial V/\partial y = 0$	$\partial \rho_c/\partial y = 0$	$q'' = cte$
طول ورودی	$u = 0$	$\partial V/\partial y = 0$	$\partial \rho_c/\partial y = 0$	$\partial T/\partial y = 0$
طول خروجی	$u = 0$	$\partial V/\partial y = 0$	$\partial \rho_c/\partial y = 0$	$\partial T/\partial y = 0$

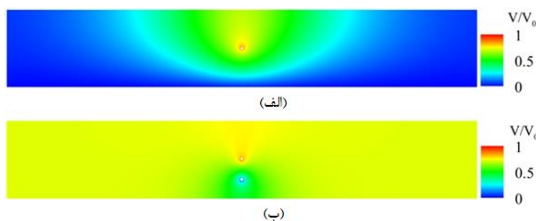


شکل ۶- توزیع جریان الکتریکی در زاویه‌های مختلف



شکل ۵- توزیع میدان الکتریکی در زاویه‌های مختلف

به مقدار متناظر در الکتروود تزریق کننده است. این خطوط از الکتروود تزریق کننده شروع و به الکتروود جمع کننده خاتمه می‌یابند. همان‌گونه که قابل مشاهده است، خطوط میدان الکتریکی در الکتروود جمع کننده سیمی متمرکز و در الکتروود جمع کننده صفحه‌ای پخش می‌شوند که عاملی مؤثر در توزیع نیروی کولمب به شمار می‌رود.

شکل ۷- توزیع بی‌بعد پتانسیل الکتریکی برای الکتروودهای جمع کننده مختلف ( $V_0 = 20 \text{ kV}$ )، الف) صفحه یکنواخت و(ب) تک سیم ( $r_g = 1 \text{ mm}$ ,  $h = 2/5 \text{ cm}$ )

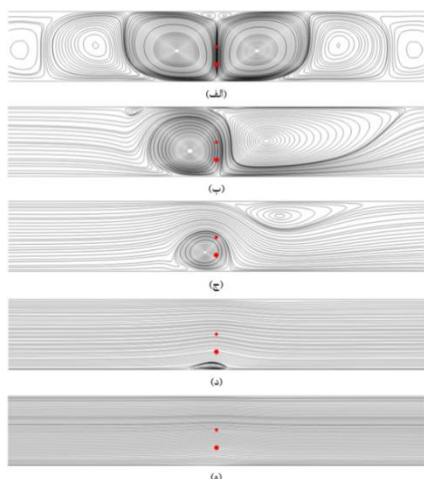
### ۵-۱- مشخصات الکتریکی در کانال

در شکل ۷، توزیع پتانسیل الکتریکی در کانال متناظر با ولتاژ اعمالی  $V_0 = 20 \text{ kV}$  به الکتروود تزریق کننده نشان داده شده است. مقادیر پتانسیل الکتریکی با استفاده از مقدار متناظر در الکتروود تزریق کننده بی‌بعد شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، گرادیان پتانسیل الکتریکی در نواحی اطراف الکتروود تزریق کننده نسبت به نواحی دیگر بیشتر است؛ در نتیجه میدان الکتریکی بسیار قوی در نزدیکی الکتروود تزریق کننده ایجاد می‌شود. پیدایش این غیریکنواختی در میدان الکتریکی، شرطی لازم جهت تولید باد کرونا است؛ همچنین تراکم بیشتر خطوط پتانسیل الکتریکی مابین الکتروودها به ازای الکتروود جمع کننده سیمی، منجر به ایجاد مقادیر میدان الکتریکی بالاتر نسبت به نمونه صفحه‌ای می‌شود. شکل ۸، نشان‌دهنده توزیع خطوط میدان الکتریکی بی‌بعد شده نسبت

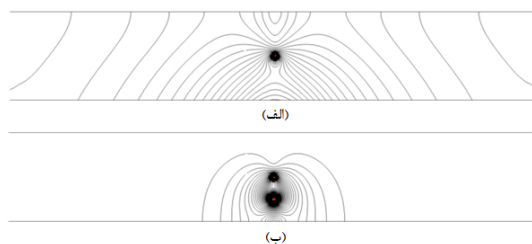
### ۳-۵- اثر رینولدز جریان و ولتاژ اعمالی

شکل ۱۰، جریان ثانویه حاصل از اعمال ولتاژ ۲۰ kV به الکتروود تزریق‌کننده را برای رینولدزهای مختلف جریان ورودی نشان می‌دهد. با مشاهده این شکل می‌توان دریافت که در رینولدزهای پایین‌تر یعنی، مادامی که مومنتم جریان ورودی کمتر است، تأثیر ولتاژ اعمالی بر سیال و انحراف آن بیشتر است. به عبارتی دیگر، انحراف سیال در رینولدزهای پایین‌تر به سمت الکتروود سیمی متصل به زمین، باعث تولید گردابه‌ای قوی‌تر و حجیم‌تر در مجاورت الکتروود تزریق‌کننده می‌شود. در نتیجه به نظر می‌رسد که پدیده الکتروهایدرودینامیک در شرایطی که مومنتم جریان ورودی کمتر باشد، مؤثرتر واقع می‌شود و در مقادیر بالاتر مومنتم، دارای قدرت و حجم گردابه تولید شده کمتری است.

اعمال ولتاژ بالا به الکتروود تزریق‌کننده، موجب ایجاد میدان الکتریکی قوی در نزدیکی الکتروود می‌شود که قابلیت یونیزه کردن مولکول‌های سیال مجاور را دارا است. یون‌های ایجاد شده هم نام با الکتروود تزریق‌کننده در اثر نیروی کولمب به طرف الکتروود جمع‌کننده هدایت می‌شوند و جریان ثانویه را تولید می‌کنند. با افزایش ولتاژ اعمالی و در اثر یونیزاسیون بیشتر، بارهای الکتریکی بیشتری تولید شده، در تقابل با جریان ورودی به کانال، گردابه‌های قوی‌تر و حجیم‌تری به وجود می‌آیند که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



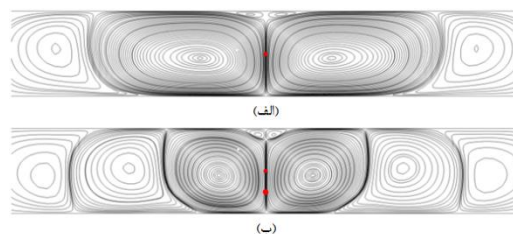
شکل ۱۰- خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف (mm)  $0/2$   
 $= \text{Re} = 1027$  (ج)  $\text{Re} = 2738$  (د)  $\text{Re} = 4108$  (هـ) بدون جریان ورودی



شکل ۸- توزیع بی‌بعد میدان الکتریکی برای الکتروودهای جمع‌کننده مختلف ( $V_0 = 20 \text{ kV}$ ,  $\Delta E = 0/0025$  الف) صفحه یکنواخت (ب) تک سیم ( $r_g = 1 \text{ mm}$ ,  $h = 2/5 \text{ cm}$ )

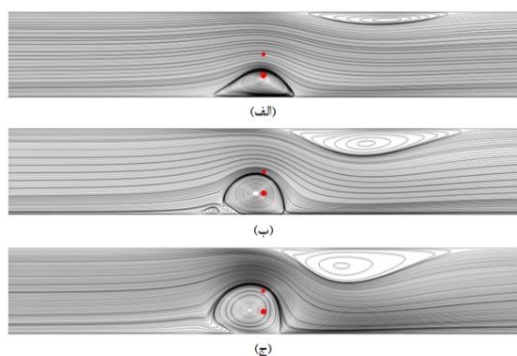
### ۲-۵- اثر میدان الکتریکی بر سیال ساکن

همزمان با اعمال ولتاژ بالا به الکتروود تزریق‌کننده و یونیزاسیون مولکول‌های هوا، این یون‌ها به سمت الکتروود جمع‌کننده حرکت کرده، در حین حرکت، این یون‌ها با مولکول‌های خنثی هوا تبادل مومنتم انجام داده، در نتیجه توده‌ای از سیال به دلیل این تبادل مومنتم شروع به حرکت می‌کند. این جریان‌ها در حضور الکتروودهای جمع‌کننده صفحه‌ای و سیمی و بدون جریان سیال ورودی به کانال، در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در صورت عدم وجود جریان ورودی به کانال، دو گردابه با الگوهای متقارن در مجاورت الکتروود تزریق‌کننده تشکیل می‌شود. در الکتروود جمع‌کننده صفحه‌ای گردابه‌ها، گستره وسیع‌تری از دیواره کانال را در مقایسه با الکتروود جمع‌کننده سیمی در بر می‌گیرند. در بحث انتقال حرارت نیز، اگرچه الگوهای جریان در صفحه متصل به زمین به دلیل بزرگی منطقه فعال، دارای رفتار بهتری است، ولی شدت موضعی میدان‌های جریان در الکتروود جمع‌کننده سیمی جالب توجه بوده، می‌تواند در کاربردهایی استفاده قرار بگیرد که نیازمند شدت موضعی میدان‌های الکتریکی و جریان است.



شکل ۹- خطوط جریان در آرایش‌های الکتروود جمع‌کننده مختلف بدون جریان سیال ورودی ( $V_0 = 20 \text{ kV}$  الف) صفحه یکنواخت (ب) تک سیم ( $r_g = 0/2 \text{ mm}$ ,  $h = 2/5 \text{ cm}$ )

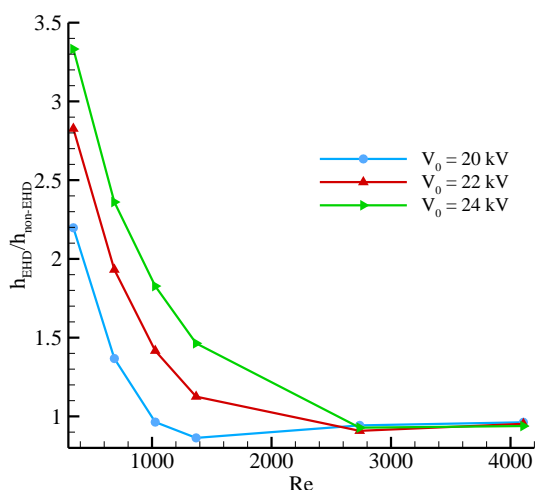




شکل ۱۱- خطوط جریان در ولتاژهای مختلف

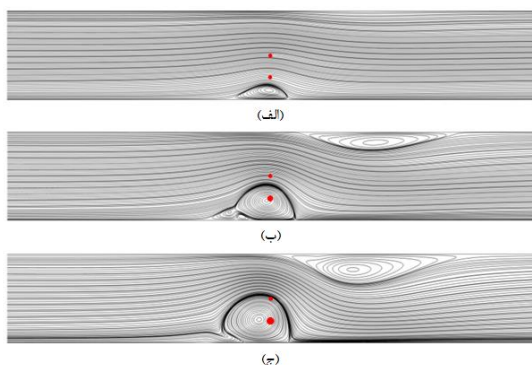
( $Re = 1027, h = 2/5 \text{ cm}, r_g = 0/2 \text{ mm}$ )

(الف)  $V_0 = 20 \text{ kV}$  (ب)  $V_0 = 22 \text{ kV}$  (ج)  $V_0 = 24 \text{ kV}$



شکل ۱۲- تغییرات نسبت ضریب انتقال حرارت متوسط در

اعداد رینولدز و ولتاژهای مختلف ( $h = 2/5 \text{ cm}, r_g = 0/2 \text{ mm}$ )



شکل ۱۳- خطوط جریان برای شعاع‌های متفاوت الکترود

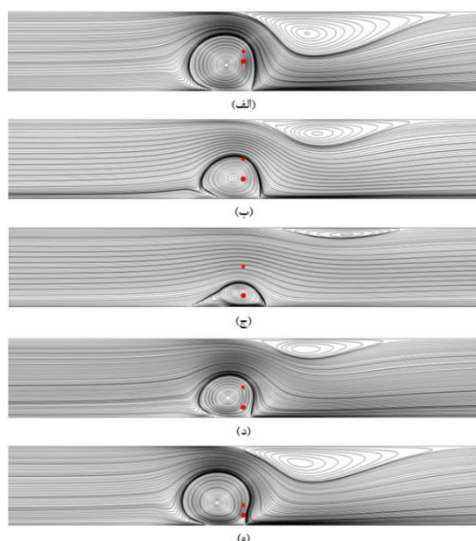
جمع‌کننده سیمی ( $V_0 = 20 \text{ kV}, Re = 1369, h = 2/5 \text{ cm}$ )

(الف)  $r_g = 0/2 \text{ mm}$  (ب)  $r_g = 0/5 \text{ mm}$  (ج)  $r_g = 1 \text{ mm}$

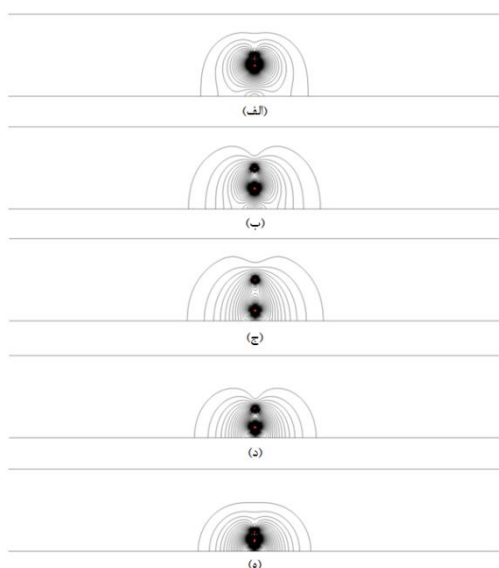
با افزایش پتانسیل الکتریکی اعمال شده به الکترود تزریق‌کننده، جریان ثانویه تقویت و گردابه‌های ایجاد شده موجب افزایش جابجایی سیال اطراف دیواره می‌شود. شکل ۱۲، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط را در اثر حضور پدیده الکتروهیدرودینامیک، نسبت به مقدار متناظر در حالت عدم حضور این پدیده برحسب عدد رینولدز و در ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که قابل مشاهده است، در اعداد رینولدز پایین که جریان ورودی دارای مومنتم کمتری است، تأثیر ولتاژ بر انحراف سیال بیشتر بوده، در نتیجه انتقال حرارت بیشتری به دست می‌آید. به عنوان مثال، در حضور میدان الکتریکی ضریب انتقال حرارت به میزان ۳۳۳/۳٪ به ازای ولتاژ ۲۴ kV و عدد رینولدز ۳۴۲ افزایش یافته است. در مقابل، با افزایش عدد رینولدز، جریان ثانویه کرونا از قدرت لازم برای انحراف جریان سیال ورودی برخوردار نبوده، توانایی مقابله با مومنتم سیال ورودی را ندارد؛ بنابراین به ازای اعداد رینولدز بالاتر از ۲۷۳۸، میزان انتقال حرارت به مقدار متناظر با حالت عدم حضور میدان الکتریکی میل می‌نماید.

#### ۴-۵- اثر شعاع الکترود جمع‌کننده

از آنجایی که در این مطالعه از الکترود سیمی به عنوان الکترود جمع‌کننده استفاده شده است، بنابراین شعاع الکترود جمع‌کننده می‌تواند از عوامل مؤثر در پدیده الکتروهیدرودینامیک باشد. شکل ۱۳، شدت تأثیرگذاری شعاع‌های مختلف الکترود جمع‌کننده سیمی بر جریان سیال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در شعاع‌های الکترود جمع‌کننده بالاتر، به دلیل زیاد شدن تعداد یون‌های ایجاد شده، قدرت جریان ثانویه در سیال افزایش می‌یابد. همچنین در جدول ۳، ضریب انتقال حرارت متوسط کانال در شعاع‌های مختلف الکترود جمع‌کننده گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شعاع الکترود جمع‌کننده، ضریب انتقال حرارت متوسط افزایش می‌یابد. با زیاد شدن شعاع الکترود جمع‌کننده، بار الکتریکی الکترود تزریق‌کننده و در نتیجه نیروی کولمب ایجاد شده نسبت به شعاع‌های کوچکتر افزایش می‌یابد؛ بنابراین در شعاع‌های بزرگتر پدیده الکتروهیدرودینامیک، بر ضریب انتقال حرارت تأثیر بیشتری دارد.



شکل ۱۴- خطوط جریان با فواصل عمودی مختلف مابین الکترودهای تزریق کننده و جمع کننده سیمی ( $r_g = 1 \text{ mm}$ ,  $V_0 = 20 \text{ kV}$ ,  $Re = 1369$ ) الف) آرایش شماره ۱، ب) آرایش شماره ۲، ج) آرایش شماره ۳، د) آرایش شماره ۴ و ه) آرایش شماره ۵



شکل ۱۵- توزیع بی بعد میدان الکتریکی با فواصل عمودی مختلف مابین الکترودهای تزریق کننده و جمع کننده سیمی ( $\Delta E = 0.0025$ ,  $V_0 = 20 \text{ kV}$ ,  $r_g = 1 \text{ mm}$ ) الف) آرایش شماره ۱ ب) آرایش شماره ۲ ج) آرایش شماره ۳ د) آرایش شماره ۴ ه) آرایش شماره ۵

جدول ۳- ضریب انتقال حرارت متوسط در شعاع‌های مختلف الکترودهای جمع کننده سیمی

$$(V_0 = 20 \text{ kV}, Re = 1369, h = 2/5 \text{ cm})$$

$r_g$ (mm)	۰/۲	۰/۵	۱
$\bar{h}$ (W/m <sup>2</sup> .K)	۱/۶۳	۲/۳۸	۳/۳

۵-۵- اثر فاصله عمودی بین الکترودهای تزریق کننده و جمع کننده

در شکل ۱۴، تأثیر آرایش‌های مختلف متشکل از فاصله عمودی جفت الکترودهای تزریق کننده و جمع کننده نسبت به یکدیگر بر الگوی جریان سیال ارائه شده است. در آرایش‌های ۱، ۲ و ۳، الکترودهای تزریق کننده در مرکز کانال قرار گرفته، الکترودهای جمع کننده به ترتیب در فواصل ۱/۲۵ cm، ۲/۵ cm و ۳/۷۵ cm نسبت به الکترودهای تزریق کننده نصب گردیده است. همچنین در آرایش‌های ۴ و ۵، الکترودهای جمع کننده در موقعیت مشابه با آرایش ۳ ثابت می‌ماند و الکترودهای تزریق کننده به ترتیب با فواصل ۱/۲۵ cm و ۲/۵ cm نسبت به الکترودهای جمع کننده به دیواره پایین کانال نزدیک می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌شود، تغییر در آرایش الکترودها از نقطه نظر فاصله عمودی مابین آن‌ها، تأثیر چشمگیری بر تولید جریان‌های ثانویه و انحراف سیال عامل می‌گذارد. کاهش فاصله بین الکترودهای تزریق کننده و جمع کننده، موجب افزایش تراکم خطوط میدان الکتریکی و بیشتر شدن شدت میدان الکتریکی و نیروی کولمب می‌شود (شکل ۱۵) که گردابه‌های حجیم تر و قوی تر را تولید می‌کند.

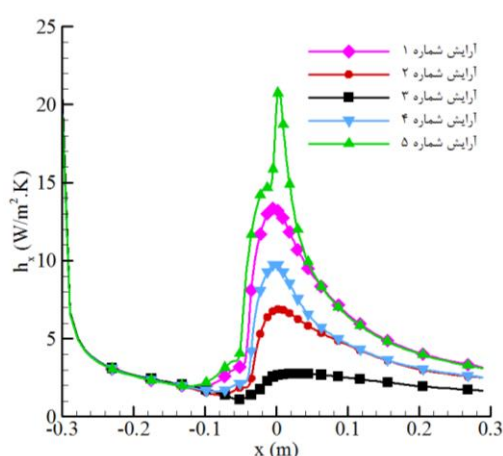
به منظور یافتن میزان تأثیر آرایش‌های الکترودهای عملکرد حرارتی آن‌ها، ضروری است که ضریب انتقال حرارت موضعی (شکل ۱۵) و متوسط (جدول ۴) بررسی شوند. نتایج نشان می‌دهند که کاهش فاصله مابین الکترودها، باعث وقوع جریان گردابه‌ای قوی تر در مجاورت آن‌ها و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شود. همچنین با کاسته شدن از فاصله الکترودهای تزریق کننده نسبت به دیواره پایین کانال، جریان ثانویه، هوای خنک بیشتری را به طرف صفحه گرم منحرف می‌کند و شدت این جریان در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد.

جدول ۴- ضریب انتقال حرارت متوسط برای فواصل

عمودی مختلف مابین الکترودهای تزریق‌کننده و

جمع‌کننده سیمی ( $V_0 = 20 \text{ kV}$ ,  $Re = 1369$ ,  $r_g = 1 \text{ mm}$ )

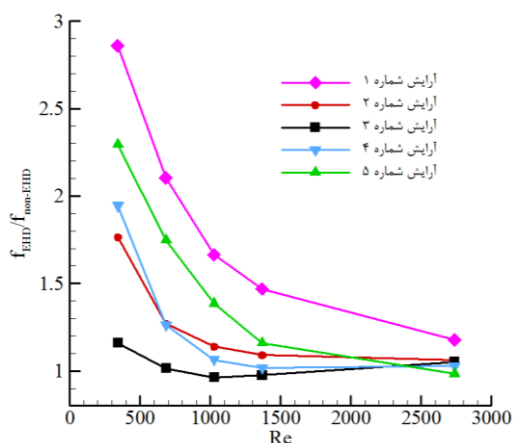
شماره آرایش	$\bar{h}$ (W/m <sup>2</sup> .K)
۱ ( $h = 1/25 \text{ cm}$ )	۴/۷۵
۲ ( $h = 2/5 \text{ cm}$ )	۳/۳
۳ ( $h = 3/75 \text{ cm}$ )	۲/۱۲
۴ ( $h = 2/5 \text{ cm}$ )	۳/۷۳
۵ ( $h = 1/25 \text{ cm}$ )	۵/۱۷



شکل ۱۶- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی با فواصل

عمودی مختلف مابین الکترودهای تزریق‌کننده و

جمع‌کننده سیمی ( $V_0 = 20 \text{ kV}$ ,  $Re = 1369$ ,  $r_g = 1 \text{ mm}$ )



شکل ۱۷- تغییرات نسبت ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز

و فواصل عمودی مختلف مابین الکترودهای تزریق‌کننده و

جمع‌کننده سیمی ( $V_0 = 20 \text{ kV}$ ,  $r_g = 1 \text{ mm}$ )

به منظور یافتن میزان تأثیر آرایش‌های الکترودی و عملکرد حرارتی آن‌ها، ضروری است که ضریب انتقال حرارت موضعی (شکل ۱۶) و متوسط (جدول ۴) بررسی شوند. مشاهده می‌شود که انتقال حرارت در اثر حضور گردابه‌های حاصل از تقابل جریان‌های ورودی و کرونا در اطراف الکترودها افزایش یافته، در نواحی دورتر با کم شدن اثر گردابه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که کاهش فاصله مابین الکترودها، باعث وقوع جریان گردابه‌ای قوی‌تر در مجاورت آن‌ها و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شود؛ در نتیجه آرایش‌های ۱ و ۵ با فاصله الکترودی ۱/۲۵ و سپس آرایش‌های ۲ و ۴ با فاصله الکترودی ۲/۵ cm، دارای بیشترین ضریب انتقال حرارت می‌باشند. همچنین برای فواصل بین الکترودی یکسان، با کاسته شدن از فاصله الکترود تزریق‌کننده نسبت به دیواره پایین کانال، جریان ثانویه هوای خنک بیشتری را به طرف صفحه گرم منحرف می‌کند و شدت این جریان در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد؛ بنابراین آرایش ۵، دارای بالاترین مقدار ضریب انتقال حرارت است.

جهت ارزیابی تأثیر فاصله عمودی بین الکترودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده بر توان موردنیاز برای ایجاد جریان ورودی به کانال، ضریب اصطکاک در اثر حضور پدیده الکترویهیدرودینامیک نسبت به مقدار متناظر در حالت عدم حضور این پدیده برحسب اعداد رینولدز مختلف و در آرایش‌های فوق‌الذکر، در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، با افزایش عدد رینولدز و غلبه مومنتم جریان ورودی بر جریان ثانویه تولید شده، نسبت ضریب اصطکاک برای تمام آرایش‌ها به عدد یک میل می‌کند. قابل ذکر است که با وجود بالاتر بودن میزان انتقال حرارت به ازای فواصل کمتر بین الکترودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده، ضریب اصطکاک دارای بیشترین مقدار است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که برای فواصل بین الکترودی یکسان، کاهش فاصله الکترود تزریق‌کننده از دیواره پایین کانال می‌تواند موجب کاهش ضریب اصطکاک شود. برای مثال، آرایش ۵ با دارا بودن بیشترین میزان انتقال حرارت، ضریب اصطکاک کمتری از آرایش ۱ دارد.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

میدان جریان و دما تحت تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیک در یک کانال مسطح تحت شرایط دوبعدی، آشفتگی، غیرقابل تراکم و پایا با روش حجم محدود مطالعه شده، به بررسی پارامترهای مؤثر از قبیل ولتاژ اعمالی، رینولدز جریان سیال ورودی، شعاع الکتروود جمع‌کننده سیمی و محل قرارگیری آن نسبت به الکتروود تزریق‌کننده پرداخته شده است. نتایج تحلیل حاکی از آن است که:

- تراکم و تمرکز بالاتر خطوط میدان الکتریکی به ازای الکتروود جمع‌کننده سیمی، موجب شدت موضعی بالاتر میدان جریان حاصل از آن در مقایسه با الکتروود جمع‌کننده صفحه‌ای می‌شود؛ لذا آن را می‌توان گزینه‌ای مناسب جهت استفاده در سیستم‌های نیازمند افزایش انتقال حرارت موضعی دانست.
- با ورود جریان به کانال و افزایش عدد رینولدز، مومنتم جریان ورودی بر جریان ثانویه تولید شده غلبه کرده، موجب کاهش انحراف سیال حاصل از باد کرونا و از بین بردن گردابه‌های حاصل از تقابل جریان‌های ثانویه و ورودی می‌شود.
- با افزایش ولتاژ، یونیزاسیون حاصل از آن گردابه‌های قوی‌تر و حجیم‌تری را تولید می‌کند که سبب افزایش انتقال حرارت تا ۳/۳ برابر معادل با ۲۳۳/۳٪ می‌شود.
- با انتخاب مناسب پارامترهای تأثیرگذار در آرایش الکتروود جمع‌کننده سیمی شامل، شعاع و فاصله آن نسبت به الکتروود تزریق‌کننده، می‌توان انتقال حرارت را به‌صورت مطلوب افزایش داد.

۷- فهرست علائم

$J$	چگالی جریان الکتریکی، $A/m^2$	$C_\mu$	ثابت مدل آشفتگی $k-\epsilon$
$k$	انرژی جنبشی آشفتگی، $J$	$E$	شدت میدان الکتریکی، $V/m$
$L$	طول مشخصه، $m$	$E_0$	میدان الکتریکی در قانون پیک، $V/m$
$L_1$	طول ورودی کانال، $m$	$f_i$	نیروی حجمی الکتروهیدرودینامیک، $N/m^3$
$L_2$	طول کانال، $m$	$h$	فاصله بین الکتروودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده، $m$
$L_3$	طول خروجی کانال، $m$	$h_x$	ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی، $W/m^2.k$
$n$	متغیر عمود بر سطح	$\bar{h}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط، $W/m^2.k$
$P$	فشار محیط، $N/m^2$	$H$	ارتفاع کانال، $m$
$q''$	شار حرارتی، $W/m^2$		
$r_e$	شعاع الکتروود تزریق‌کننده، $m$		
$r_g$	شعاع الکتروود جمع‌کننده، $m$		
$Re$	عدد رینولدز		
$t$	زمان، $s$		
$T$	دمای محیط، $K$		
$T_{w,x}$	دمای دیواره، $K$		
$T_{in}$	دمای ورودی کانال، $K$		
$T_{out}$	دمای خروجی کانال، $K$		
$T_{ref}$	دمای مرجع، $K$		
$u$	سرعت، $m/s$		
$U_\infty$	سرعت ورودی به کانال، $m/s$		
$V$	پتانسیل الکتریکی، $V$		
$V_0$	پتانسیل الکتریکی در الکتروود تزریق‌کننده، $V$		
$x$	مختصات در جهت افقی کانال، $m$		
$y$	مختصات در جهت عمودی کانال، $m$		
$\alpha$	نفوذ حرارتی، $m^2/s$		
$\alpha_t$	نفوذ حرارتی آشفتگی، $m^2/s$		
$\beta$	یون‌پذیری، $m^2/V.s$		
$\epsilon$	ضریب گذردهی الکتریکی، $F/m$		
$\theta$	زاویه بین خط عمودی و خط واصل از الکتروود تزریق‌کننده به صفحه، Degree		
$\mu$	لزجت دینامیکی، $kg/m.s$		
$\mu_t$	لزجت دینامیکی آشفتگی، $kg/m.s$		
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$		
$\rho_c$	چگالی بار الکتریکی، $C/m^3$		
$\sigma_E$	نفوذ الکتریکی، $1/\Omega.m$		

علائم یونانی

- ۸- مراجع
- [12] Lakeh RB, Molki M (2013) Enhancement of convective heat transfer by electrically-induced swirling effect in laminar and fully-developed internal flows. *J Electrostat* 71: 1086-1099.
- [13] 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. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 3(4): 103-110.
- [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* 71: 656-665.
- [15] Ayuttaya SSN, Chaktranond C, Rattanadecho P (2013) Numerical analysis of electric force influence on heat transfer in a channel flow (theory based on saturated porous medium approach). *Int J Heat Mass Tran* 64: 361-374.
- [16] Moghanlou FS, Khorrami AS, Esmaeilzadeh E, Aminfar H (2014) Experimental study on electrohydrodynamically induced heat transfer enhancement in a minichannel. *Exp Therm Fluid Sci* 59: 24-31.
- [17] FLUENT 6.3 user's guide, Fluent Inc., Lebanon, NH (2006).
- [18] Mostajiri Abid k, Amanifard N, Mohaddes Deylami H, Dolati F (2015) Numerical investigation of the electric field effects on the flow and forced convection heat transfer over a backward-facing step. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 5(2): 231-246.
- [19] Adamiak K, Atten P (2004) Simulation of corona discharge in point-plane configuration. *J Electrostat* 61: 85-98.
- [20] 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.
- [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.
- [4] Lai FC, Lai KW (2002) EHD-enhanced drying with wire electrode. *Drying Technology* 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] Kasayapanand N, Kiatsiriroat T (2005) EHD enhanced heat transfer in wavy channel. *Int Commun Heat Mass* 32: 809-821.
- [8] Go DB, Maturana RA, Fisher TS, Garimella SV (2008) Enhancement of external forced convection by ionic wind. *Int J Heat Mass Tran* 51: 6047-6053.
- [9] 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.
- [10] Shakouri Pour M, Esmaeilzadeh 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.
- [11] Lakeh RB, Molki M (2012) Targeted heat transfer augmentation in circular tubes using a corona jet. *J Electrostat* 70: 31-42.