



## تحلیل عددی قدرت جریان ثانویه ناشی از محرک الکتروهیدرودینامیک در یک کانال مسطح

حسام مویدی<sup>۱</sup>، نیما امانی فرد<sup>۱\*</sup>، حامد محدث دیلمی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۲- دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، رودسر، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۴

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۵

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۰/۰۵

### کلمات کلیدی:

تحلیل عددی

شار ورتیسیتی

الکتروهیدرودینامیک

انتقال حرارت

**خلاصه:** در مقاله حاضر، تأثیر جریان ثانویه ناشی از محرک الکتروهیدرودینامیک بر شار ورتیسیتی، به عنوان معیار قدرت جریان ثانویه و گردابه‌های ناشی از آن درون یک کانال مسطح به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای حل معادلات میدان‌های الکتریکی، جریان و دما از روش حجم محدود استفاده شده است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای مؤثر بر پدیده الکتروهیدرودینامیک از قبیل عدد رینولدز، ولتاژ اعمالی و آرایش الکترود تزریق‌کننده بر شار ورتیسیتی و همچنین رابطه بین جریان و انتقال حرارت سیال با شار ورتیسیتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در حضور میدان الکتریکی، با افزایش عدد رینولدز جریان ورودی، ابعاد گردابه‌های اولیه ناشی از باد کرونا و شار ورتیسیتی بی‌بعد کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شده که با افزایش ولتاژ، ابعاد گردابه‌های اولیه و ثانویه ناشی از باد کرونا و شار ورتیسیتی بی‌بعد افزایش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که رفتار ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد کاملاً مشابه و وابسته به ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد می‌باشد. همچنین، با نزدیک شدن الکترود تزریق‌کننده به ورودی کانال نسبت به موقعیت الکترود نزدیک به خروجی کانال، شار ورتیسیتی بی‌بعد متوسط و ضریب افزایش انتقال حرارت متوسط، به ترتیب ۲۷/۹ و ۱۷/۹ درصد افزایش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

ورتیسیتی<sup>۱</sup> یکی از ویژگی‌های ذاتی جریان سیال است و به عنوان فرآیندی کارآمد در پدیده انتقال حرارت و انتقال جرم شناخته می‌شود. ورتیسیتی در انواع جریان سیال همچون جریان لایه مرزی در ناحیه نزدیک دیواره [۱] و جریان بر روی سطوح منحنی به طور طبیعی وجود دارد. همچنین در بسیاری از موارد، ورتیسیتی توسط جریان ثانویه<sup>۲</sup> به منظور افزایش انتقال حرارت و انتقال جرم به صورت مصنوعی تولید می‌شود [۲ و ۳].

استفاده از پدیده الکتروهیدرودینامیک<sup>۳</sup> به عنوان یک روش فعال برای تولید جریان ثانویه، یکی از مهم‌ترین روش‌هایی است که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است. مکانیزم این روش شامل تأثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان و دما است. در این روش تحت تأثیر میدان الکتریکی حاصل از زوج الکترود متصل به منبع

تغذیه ولتاژ بالا، مولکول‌های سیال دی‌الکتریک<sup>۴</sup> ساکن و یا در حال حرکت تشکیل دوقطبی الکتریکی می‌دهند. این دوقطبی‌ها در نقاط با شعاع انحنای کوچک الکترود تزریق‌کننده<sup>۵</sup> که دارای گردان‌های شدید میدان الکتریکی است، تجزیه شده که به این پدیده تخلیه کرونا<sup>۶</sup> گفته می‌شود. در اثر این پدیده، ناحیه‌ای کوچک در اطراف الکترود تزریق‌کننده به نام منطقه یونیزاسیون تشکیل می‌شود که شامل یون‌های مثبت و منفی حاصل از یونیزاسیون است. در خارج از این منطقه یون‌های همانم با الکترود تزریق‌کننده، تحت اثر نیروی حجمی حاصل از میدان الکتریکی به صورت توده‌ای به سمت الکترود جمع‌کننده<sup>۷</sup> حرکت می‌کنند. این یون‌ها در طول حرکت بخشی از مومنت خود را در اثر برخورد و یا تنش برشی ناشی از اتلاف ویسکوزیته به مولکول‌های خنثی انتقال داده و موجب هدایت آن‌ها به سمت الکترود جمع‌کننده شده و در نتیجه جریانی با نام باد کرونا

- 4 Dielectric
- 5 Emitting electrode
- 6 Corona discharge
- 7 Collector electrode

- 1 Vorticity
- 2 Secondary flow
- 3 Electrohydrodynamics

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: namanif@guilan.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



انتقال حرارت دارد. پنگ و همکاران [۱۰] بهبود انتقال حرارت در یک کانال مسطح مستطیلی در حضور میدان الکتریکی را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر مکان طولی برای حالت تک الکتروود تزریق کننده و آرایش طولی برای چندین الکتروود تزریق کننده را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که با نزدیک شدن تک الکتروود تزریق کننده به ورودی کانال، ضریب انتقال حرارت به بیشینه مقدار خود می‌رسد. همچنین دریافتند که افزایش تعداد الکتروود تزریق کننده موجب افزایش مصرف انرژی می‌شود اما الزاماً موجب بهبود انتقال حرارت نخواهد شد. وانگ و همکاران [۱۱] تأثیر چیدمان جفت الکتروود تزریق کننده بر نرخ انتقال حرارت درون یک کانال مستطیلی را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها همچنین تأثیر اندازه و مکان الکتروودهای جمع کننده را نیز بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که به ازای چیدمان مناسب الکتروودهای تزریق کننده و جمع کننده، افزایش ضریب انتقال حرارت برای دیواره بالا و پایین به ترتیب ۱۶۶٪ و ۲۴۲٪ می‌باشد. اکثر مطالعات گذشته، تأثیر پارامترهایی همچون هندسه، عدد رینولدز، ولتاژ اعمالی، چیدمان الکتروودهای تزریق کننده و الگوی الکتروودهای جمع کننده را بر میدان سرعت و ضریب انتقال حرارت بررسی کرده‌اند و توجه‌ای به نقش شدت ورتیسیتی در پدیده الکترووددینامیک نشده است.

برخی مطالعات، رابطه پارامترهای نشان‌دهنده قدرت جریان ثانویه همچون گردش گردابه<sup>۱</sup> و شار ورتیسیتی<sup>۲</sup> با انتقال حرارت را بررسی کردند. اکثر این مطالعات قدرت جریان ثانویه حاصل از حضور مولد گردابه درون کانال را بررسی کرده‌اند. چانگ و همکاران [۱۲] استفاده از شار ورتیسیتی متوسط در هر سطح مقطع را به عنوان معیار اصلی محاسبه قدرت جریان ثانویه ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که رفتار عدد ناسلت محلی با شار ورتیسیتی متوسط در هر مقطع مشابه است. سونگ و وانگ [۱۳] تأثیر چیدمان مولد گردابه بر قدرت جریان ثانویه، افزایش انتقال حرارت و ضریب اصطکاک در یک مبدل حرارتی را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها قدرت جریان ثانویه را بر اساس شار ورتیسیتی متوسط در هر سطح مقطع محاسبه نمودند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش قدرت جریان ثانویه، انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نیز افزایش می‌یابند. لمانند و همکاران [۱۴] انتقال حرارت درون یک کانال مستطیلی در حضور مولد گردابه را بر اساس

ایجاد می‌شود [۴]. از این پدیده جهت ایجاد شتاب و حرکت در سیال ساکن نیز بهره برده می‌شود [۵]. در صنعت هوافضا، محرک‌های الکترووددینامیک جهت کاهش نیروی بازدارندگی هواپیما و یا پایداری جریان استفاده می‌شوند [۶]. همچنین در صنایع غذایی، جریان کرونا یکی از روش‌های نوین به منظور بالا بردن بازدهی فرآیند خشک کردن مواد متخلخل می‌باشد [۴].

تقوی و همکاران [۷]، تأثیر پیکربندی الکتروود جمع کننده چندگانه بر توزیع میدان الکتریکی، افزایش انتقال حرارت و الگوی جریان چرخشی در یک کانال مسطح را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها از دو نوع پیکربندی متفاوت الکتروود جمع کننده صفحه‌ای و سیمی استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از الکتروودهای جمع کننده چندگانه، سبب تغییرات قابل توجه در الگوی جریان و انتقال حرارت می‌شود. آیوتا و همکاران [۸]، تأثیر آرایش‌های مختلف الکتروودهای تزریق کننده و جمع کننده را بر توزیع میدان الکتریکی و میدان جریان به صورت عددی تحلیل نمودند. آن‌ها نشان دادند که آرایش‌های مختلف الکتروودی منجر به شکل‌گیری الگوهای متفاوت در جریان‌های چرخشی می‌شود. همچنین اندازه گردابه‌های ناشی از محرک الکترووددینامیک با افزایش نیروی اینرسی حاصل از جریان ورودی به کانال، کاهش می‌یابد. دولتی و همکاران [۴] تأثیر جریان کرونا بر خشک کردن یک جسم متخلخل درون یک کانال صاف را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر مکان الکتروود تزریق کننده در راستای افقی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بدون اعمال میدان الکتریکی، با افزایش عدد رینولدز نرخ خشک کردن جسم مرطوب افزایش می‌یابد. همچنین در حضور میدان الکتریکی با ثابت ماندن عدد رینولدز، با افزایش ولتاژ اعمالی تأثیر پدیده الکترووددینامیک بر نرخ خشک کردن افزایش می‌یابد. علاوه بر این آرایش بهینه از منظر مصرف انرژی ویژه را نیز بررسی کردند. دیلمی و همکاران [۹] انتقال حرارت در یک کانال مسطح را در حضور محرک الکترووددینامیک به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که تأثیر محرک الکترووددینامیک با افزایش ولتاژ اعمالی و کاهش شعاع الکتروود تزریق کننده، در اعداد رینولدز پایین‌تر بیشتر بوده و موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود. همچنین انتخاب آرایش مناسب الکتروودها و فاصله بهینه مابین آن‌ها، تأثیر قابل توجهی بر افزایش

1 Vortex circulation

2 Vorticity flux

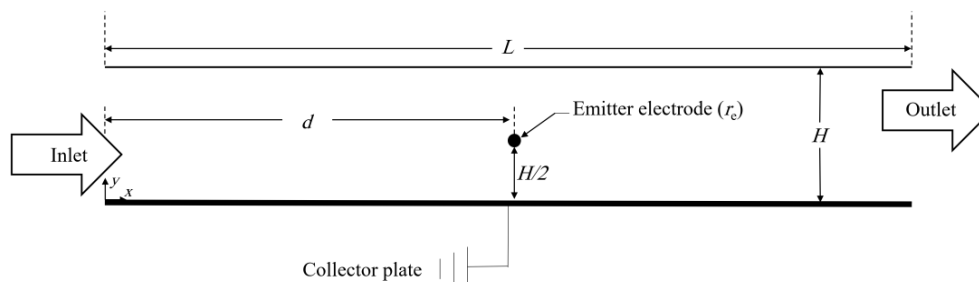


Fig. 1. Schematic view of the computational domain

شکل ۱: نمایی شماتیک از دامنه محاسباتی

همچنین دیگر هدف اصلی مطالعه حاضر این است که آیا شار ورتیسیتی متوسط معیار مناسبی برای ارزیابی نرخ انتقال حرارت موضعی و بهبود عملکرد پدیده الکتروهایدرودینامیک می‌باشد؟ در این مطالعه، شار ورتیسیتی بی‌بعد در جریان ثانویه ناشی از پدیده الکتروهایدرودینامیک به عنوان پارامتر ارتباطی بین شار ورتیسیتی و نرخ انتقال حرارت تعریف شده است و ارتباط این پارامتر با توجه به ساختار جریان بررسی می‌گردد. همچنین تأثیر پارامترهای مؤثر بر پدیده الکتروهایدرودینامیک از قبیل عدد رینولدز، ولتاژ اعمالی و آرایش الکتروود تزریق‌کننده بر شار ورتیسیتی نیز به عنوان نوآوری این مقاله می‌باشد.

## ۲- هندسه مسئله

نمای شماتیکی از هندسه دو بعدی مسئله مورد نظر، ابعاد به کار رفته و مکان قرارگیری الکتروود تزریق‌کننده و جمع‌کننده در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات هندسی کانال در جدول ۱ ارائه شده است.

هوا به عنوان سیال عامل با سرعت ورودی مشخص از سمت چپ وارد کانال می‌شود و از سمت دیگر کانال خارج می‌شود. خواص فیزیکی سیال در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۳- معادلات حاکم

### ۳-۱- معادلات میدان الکتریکی

نیروی حجمی اعمال شده توسط میدان الکتریکی بر میدان جریان سیال به صورت زیر بیان می‌شود. [۱۵].

عبارت اول در رابطه (۱) نیروی کولمب<sup>۱</sup> حاصل از اعمال میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. جملات دوم و سوم رابطه فوق به ترتیب

1 Coulomb force

شار ورتیسیتی متوسط در هر سطح مقطع به صورت عددی بررسی نموند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که شار ورتیسیتی متوسط در راستای جریان بر روی مولد گردابه به مقدار بیشینه رسیده و موجب افزایش عدد ناسلت می‌گردد.

مویدی و همکاران [۱۵] به صورت عددی مدل میکروپولار را به عنوان یک مدل جایگزین برای شبیه‌سازی پدیده الکتروهایدرودینامیک در محدوده رژیم جریان آرام درون یک کانال مستطیلی ارزیابی کردند. آن‌ها تأثیر موقعیت طولی الکتروود تزریق‌کننده، فاصله بین الکتروود تزریق‌کننده و الکتروود جمع‌کننده و نیز آرایش طولی الکتروود تزریق‌کننده بر پارامتر مادی مدل میکروپولار را بررسی کردند. همچنین به منظور بررسی صحت و دقت نتایج حاضر، نتایج مدل میکروپولار را با نتایج مربوط به شبیه‌سازی مدل جریان کاملاً آشفته کی-ا-پسیلون استاندارد مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که برای هر نوع جریان الکتروهایدرودینامیک با شرایط مشخص، پارامتر مادی دارای یک مقدار مناسب است که به ازای آن مقدار، نتایج مدل میکروپولار با نتایج مدل آشفته کی-ا-پسیلون استاندارد مطابقت دارد.

بر اساس مطالعه دیگر محققان و با توجه به عدم بررسی شار ورتیسیتی در جریان‌های تحت تأثیر محرک الکتروهایدرودینامیک و همچنین عدم استفاده از این پارامتر جهت تحلیل الگوی جریان و انتقال حرارت، نوآوری مطالعه حاضر بررسی تأثیر قدرت جریان ثانویه و شار ورتیسیتی متوسط بر عملکرد این پدیده در تغییر الگوی جریان و تأثیر آن بر افزایش نرخ انتقال حرارت می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات هندسی کانال

Table 1. Geometric parameters of channel

پارامتر	مقدار
$H$ (cm)	۱۰
$L$ (cm)	۶۰
$r_e$ (mm)	۰٫۲
$d$ (cm)	۱۰٫۳۰٫۵۰

جدول ۲: خواص سیال  
Table 2. Properties of fluid

مقدار	پارامتر
۱,۲۲۵ kg/m <sup>3</sup>	چگالی ( $\rho$ )
۰,۰۲۴۲ W/m.K	ضریب هدایت حرارتی ( $K$ )
۰,۰۰۰۲ m <sup>2</sup> /V.s	ضریب یون پذیری ( $\beta$ )
۸,۸۵×۱۰ <sup>-۱۲</sup> F/m	ضریب گذردهی الکتریکی ( $\epsilon_e$ )
۱۰۰۶,۴۳ J/g.K	ظرفیت گرمای ویژه ( $c_p$ )
۱,۷۸۹× kg/m.s ۱۰ <sup>-۵</sup>	ویسکوزیته دینامیکی ( $\mu$ )

$$E_i = -\nabla V \quad (5)$$

سه عبارت سمت راست رابطه (۴) به ترتیب تحرک یونی، جابه‌جایی الکتریکی و هدایت الکتریکی نامیده می‌شوند. به دلیل اینکه در تحقیق کنونی اندازه‌ی ضریب هدایت الکتریکی سیال عامل (هوا) بسیار کم است ( $\gamma = ۱,۶ \times ۱۰^{-۲۳} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ )، از ترم هدایت الکتریکی صرف‌نظر می‌شود. همچنین در پدیده الکتروهایدرودینامیک، از آنجا که یون‌ها به سرعت در دامنه میدان الکتریکی حرکت می‌کنند، می‌توان حرکت آن‌ها را مستقل و جدا از حرکت انتقالی ناشی از حرکت سیال (جابه‌جایی الکتریکی) فرض کرد. سرعت حرکت یون‌ها تقریباً چندین مرتبه از سرعت سیال بزرگتر می‌باشد. به دلیل اینکه بزرگی تحرک یونی در پدیده الکتروهایدرودینامیک نسبت به جابه‌جایی الکتریکی و هدایت الکتریکی از مرتبه بالاتری برخوردار است، از عبارت‌های جابه‌جایی الکتریکی و هدایت الکتریکی صرف‌نظر می‌شود [۹]

با اعمال فرضیات فوق و ترکیب رابطه‌های (۳) تا (۵)، قانون بقای جریان الکتریکی به صورت زیر ساده می‌شود:

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

رابطه‌های (۲)، (۵) و (۶) معادلات اساسی حاکم بر میدان الکتریکی می‌باشند که به‌منظور تعیین نیروی کولمب به‌طور هم‌زمان حل می‌شوند.

### ۲-۳- معادلات میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل پیوستگی، مومنتم و بقای انرژی می‌باشند. از آنجایی که جریان ثانویه ایجاد شده توسط محرک الکتروهایدرودینامیک یک جریان آشفته است، بنابراین نیاز است که

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

معرف نیروی دی‌الکتروفورتیک<sup>۱</sup> و نیروی الکترواسترکتیو<sup>۲</sup> است که به دلیل ثابت بودن ضریب گذردهی الکتریکی برای سیال تراکم‌ناپذیر هوا صرف‌نظر می‌شوند. بنابراین تنها مؤلفه مؤثر در این مطالعه، نیروی کولمب خواهد بود [۹]

به‌منظور تعیین نیروی حجمی ناشی از اعمال میدان الکتریکی و افزودن آن به معادلات مومنتم، معادلات پتانسیل الکتریکی و بقای جریان الکتریکی به عنوان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی به صورت رابطه‌های (۲) و (۳) تعریف می‌شوند [۱۵]

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

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

که در رابطه (۳)،  $J_{ei}$  چگالی جریان الکتریکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

که در این رابطه،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب، یون‌پذیری و هدایت الکتریکی می‌باشند.

$$J_{ei} = \rho_c \beta E_i + \rho_c u_i + \gamma E_i \quad (4)$$

همچنین شدت میدان الکتریکی از رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

- 1 Dielectrophoretic force
- 2 Electrostrictive force

جدول ۳: شرایط مرزی

Table 3. Boundary conditions

مرز	دما	جریان	پتانسیل الکتریکی	چگالی بار الکتریکی
ورودی کانال	$T_0=293$	$u = u_0$	$\partial V / \partial x = 0$	$\partial \rho_c / \partial x = 0$
خروجی کانال	$\partial T / \partial x = 0$	$P = 0$	$\partial V / \partial x = 0$	$\partial \rho_c / \partial x = 0$
الکتروود تزریق کننده	$\partial T / \partial n = 0$	$u = 0$	$V = V_0$	قانون پیک
دیواره پایین	$q'' = 100$	$u = 0$	$V = 0$	$\partial \rho_c / \partial y = 0$
دیواره بالا	$q'' = 0$	$u = 0$	$\partial V / \partial y = 0$	$\partial \rho_c / \partial y = 0$

شرایط مرزی دما، سرعت، پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی در جدول ۳ ارائه شده است.

تعیین شرط مرزی چگالی بار الکتریکی بر روی الکتروود تزریق کننده به طور مستقیم قابل محاسبه نیست و با سعی و خطا به دست می آید. در این مطالعه از فرضیه کاپتزوف<sup>۱</sup> و قانون پیک به منظور تعیین چگالی بار الکتریکی استفاده شده است. فرضیه کاپتزوف بیان می کند که بعد از شروع تخلیه کرونا، میدان الکتریکی با افزایش ولتاژ ثابت می ماند. بر اساس این فرضیه، چگالی بار الکتریکی بر روی الکتروود تزریق کننده حدس زده می شود و میدان الکتریکی محاسبه و سپس با عدد پیک محاسبه شده از رابطه (۱۱) مقایسه می شود. این روند سعی و خطا تا زمان برابر شدن میدان الکتریکی بدست آمده از حل عددی و مقدار حاصل از رابطه پیک<sup>۲</sup> ادامه می یابد [۱۶].

$$E_0 = 3.1 \times 10^6 \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{r_e}} \right) \quad (11)$$

در رابطه فوق  $r_e$  شعاع الکتروود تزریق کننده بر حسب سانتی متر است.

#### ۴- روند حل عددی

در این مطالعه، به منظور حل عددی معادلات حاکم، از نرم افزار فلوننت استفاده شده و روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات حاکم در نظر گرفته شده است. معادلات میدان الکتریکی به صورت ناپایا و معادلات سیال به صورت پایا حل شده اند. ابتدا معادلات میدان الکتریکی به روش صریح و ناپایا، حل می شوند. به منظور حل همزمان این معادلات از توابع تعریف شده توسط کاربر<sup>۳</sup> نرم افزار

جریان سیال به صورت آشفته مدل سازی شود [۵-۱۰]. در این مطالعه، جهت مدل سازی جریان آشفته، مدل آشفتگی دو معادله ای کی-اِپسیلون استاندارد بر پایه معادلات متوسط گیری شده مومنتم به کار رفته است [۵-۱۰]. همچنین خواص ترمودینامیکی سیال ثابت در نظر گرفته شده است. در ادامه معادلات حاکم بر جریان سیال آشفته با فرض جریان دو بعدی و تراکم ناپذیر بیان شده است.

پیوستگی:

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

مومنتم:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla P + (\mu + \mu_t)\nabla^2 u + F_{ei} \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

انرژی:

$$u \cdot \nabla T = \nabla \cdot ((\alpha + \alpha_t)\nabla T) \quad (10)$$

همان گونه که از رابطه (۸) مشخص می باشد، عبارت آخر معادلات ناویر-استوکس نیروی کولمب حاصل از اعمال میدان الکتریکی بر جریان سیال است که از حل معادلات میدان الکتریکی تعیین می گردد.

#### ۳-۳- شرایط مرزی

هوا به عنوان سیال عامل و با سرعت یکنواخت و دمای مشخص در نظر گرفته شده است. شرط فشار معین در مرز خروجی در نظر گرفته شده است. دیواره های بالا و پایین به ترتیب به صورت آدیاباتیک و شار حرارتی ثابت و همه مرزهای جامد دارای شرط عدم لغزش می باشند.

1 Kaptsov theory  
2 peek  
3 User Defined Functions

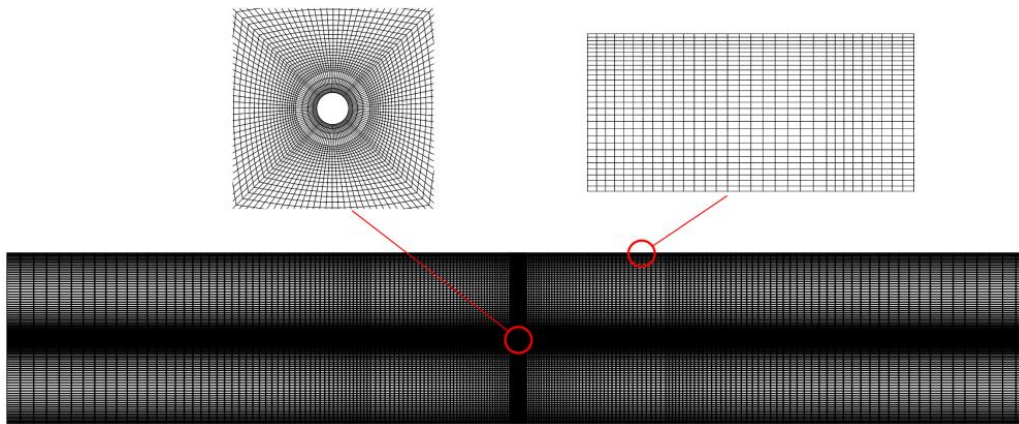


Fig. 2. The view of domain grid distribution

شکل ۲. نمایی از شبکه محاسباتی

تراکم شبکه‌بندی در این نواحی نسبت به دیگر نواحی بیشتر می‌باشد. ضمناً ناحیه محاسباتی به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی شده است تا کنترل بهتری بر روی شبکه تولیدی صورت گیرد. به‌منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، توزیع سرعت در جهت جریان در موقعیت طولی ۰٫۳۳ متر در امتداد ارتفاع کانال به‌عنوان پارامتر استقلال از شبکه انتخاب شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، از چهار شبکه‌بندی مختلف در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و ولتاژ اعمالی ۱۸ کیلوولت استفاده شده است. با توجه به شکل ۳ واضح است که با تغییر تعداد شبکه از ۳۳۶۲۰ به ۴۲۲۰۰ تفاوت اندکی در جواب‌ها مشاهده می‌شود، بنابراین شبکه با تعداد ۳۳۶۲۰ به لحاظ داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که استقلال از شبکه

فلوئنت استفاده شده است که بر پایه برنامه به زبان C می‌باشد. برای این منظور بعد از یافتن مقدار مناسب چگالی بار الکتریکی بر روی الکترود تزریق‌کننده، حل تا همگرایی میدان‌های پتانسیل و چگالی بار الکتریکی ادامه می‌یابد. پس از همگرا شدن حل، نیروی کولمب جهت افزودن به معادله مومنتم محاسبه می‌شود. جهت گسسته‌سازی ترم فشار و سایر ترم‌های معادلات به ترتیب، روش استاندارد و تقریب مرتبه دوم و همچنین برای حل همزمان میدان فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل<sup>۱</sup> استفاده شده است. به منظور تشخیص همگرایی، معیار کاهش باقیمانده‌های تراز شده  $10^{-8}$  می‌باشد. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر هفت هسته‌ای ۲ گیگاهرتز اینتل انجام شده و زمان محاسباتی حدود ۲ الی ۴ ساعت برای معادلات جریان الکتریکی و حدود ۲ الی ۴ ساعت برای معادلات جریان سیال می‌باشد.

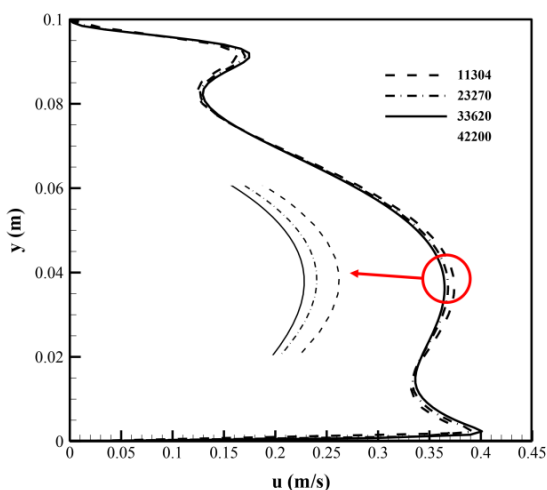


Fig. 3. Grid independence test for velocity profile at  $x=0.33$  m ( $V_0=18$  kV,  $Re=1000$ ,  $d=30$  cm)

شکل ۳: توزیع سرعت در  $x=0.33$  m و در امتداد ارتفاع کانال برای شبکه‌های مختلف

#### ۵- شبکه محاسباتی و استقلال حل از شبکه محاسباتی

شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی توسط نرم افزار تجاری گمبیت ۲٫۴ به صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و مستطیلی ایجاد شده و همچنین در نواحی که گرادیان‌های شدید مورد انتظار است از تراکم بیشتری نسبت به دیگر نواحی استفاده شده است. به عنوان مثال، پارامترهای میدان الکتریکی در اطراف الکترودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده و تغییرات دما و سرعت در نزدیکی دیواره‌ها دارای گرادیان‌های شدید می‌باشند و به همین دلیل، همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود،

- 1 Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE)
- 2 Gambit2.4



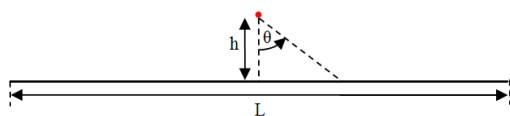


Fig. 4. View of two-dimensional geometry of Oussalah and Zebboudj [18]

شکل ۴. نمایی از هندسه دوبعدی اوسالا و زبوج [۱۸]

مقایسه شده است. آن‌ها به صورت تجربی توزیع میدان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی بر روی یک صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند. هندسه مورد مطالعه آن‌ها در شکل ۴ به صورت شماتیک نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر با داده‌های تجربی مقایسه شده و با بیشینه خطای ۷٫۴ درصد نسبت به نتایج تجربی از تطابق مطلوبی برخوردار است. دلیل بروز این خطا می‌تواند ناشی از خطای گردسازی، خطای قطع، خطای همگرایی و خطای مدل‌سازی باشد. خطای مدل‌سازی به دلیل فرضیات در نظر گرفته شده، شرایط مرزی و ایجاد هندسه، سهم عمده‌ای در بین خطاها به خود اختصاص داده است. در پدیده الکتروهایدرودینامیک به دلیل صرف‌نظر کردن از ماهیت یونیزاسیون در حل عددی، حذف نیروهای ایجاد شده در اثر غیریکنواختی میدان الکتریکی، تغییرات ضریب گذردهی سیال و تغییرات یون‌پذیری هوا خطای ناشی از مدل‌سازی را کاملاً برجسته می‌کند.

همچنین جهت بررسی صحت نتایج عددی جریان سیال، توزیع مؤلفه‌ی سرعت در راستای  $y$ ، بر روی خطی موازی با دیواره کانال در

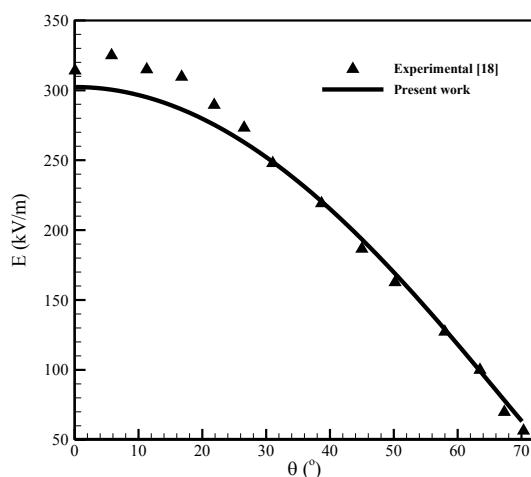


Fig. 5. Electric field distribution at the smooth plate,  $V_0=18$  kV

شکل ۵. مقدار میدان الکتریکی بر روی صفحه تخت در ولتاژ اعمالی ۱۸ کیلوولت

برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۶- تحلیل داده‌ها

قدرت جریان ثانویه ناشی از اعمال محرک الکتروهایدرودینامیک در مکانیزم افزایش انتقال حرارت یکی از عوامل مهم است که به پارامترهای زیادی مانند عدد رینولدز، ولتاژ اعمالی و مکان الکترودها وابسته است. به منظور ارزیابی قدرت جریان ثانویه ناشی از محرک الکتروهایدرودینامیک، شار ورتیسیتی متوسط در هر مقطع ( $J$ ) مطابق رابطه (۱۲) مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]

$$J = \frac{\iint_S |\omega_z| dz dy}{\iint_S dz dy} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)  $\omega_z$  ورتیسیتی و  $S$  سطح مقطع کانال است. همچنین، یک عدد بی‌بعد از شار ورتیسیتی به صورت زیر تعیین می‌گردد [۱۲]

$$\sigma = \frac{JS}{UH} \quad (13)$$

در این رابطه  $U$  سرعت متوسط جریان در هر مقطع و  $H$  ارتفاع کانال می‌باشد. همچنین برای مقایسه و ارزیابی تأثیر قدرت جریان ثانویه، نسبت شار ورتیسیتی بی‌بعد تحت تأثیر میدان الکتریکی به شار ورتیسیتی بی‌بعد بدون اعمال میدان الکتریکی ( $\sigma_{EHD}/\sigma_{non-EHD}$ ) که ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد نامیده می‌شود، انتخاب می‌گردد.

ضریب انتقال حرارت موضعی مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود

$$h_x = \frac{q''}{(T_{wall,x} - T_0)} \quad (14)$$

در این رابطه،  $q''$  شار حرارتی ثابت منتقل شده از سطح دیواره پایین به کانال،  $T_{wall,x}$  دمای موضعی دیواره پایین و  $T_0$  دمای سیال ورودی می‌باشد.

## ۷- بحث و بررسی نتایج

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج میدان الکتریکی و تعیین دقیق نیروی کولمب، نتایج تحلیل عددی حاضر با نتایج تجربی اوسالا و زبوج [۱۸]

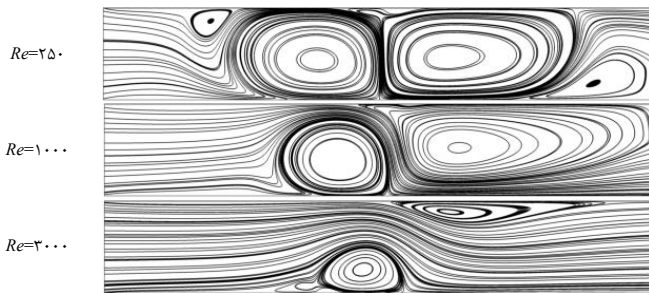


Fig. 7. Airflow streamlines ( $d=0.3$  m,  $V_0=18$  kV)  
شکل ۷. خطوط جریان سیال ( $d=0.3$  m,  $V_0=18$  kV)

۲۵۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ به ترتیب حدود ۴٫۲۵، ۴٫۱ و ۲٫۸۲ می‌باشد. از آنجایی که تغییرات توزیع ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد تابعی از مکان و اندازه گردابه‌های ناشی از پدیده الکتروهیدرودینامیک است، بنابراین بررسی اندازه گردابه‌ها دارای اهمیت فراوان است. در شکل ۹ نمایی شماتیک از ابعاد گردابه‌های اولیه و ثانویه نشان داده شده است. در جدول ۴ ابعاد گردابه‌های اولیه و ثانویه ناشی از محرک الکتروهیدرودینامیک برای اعداد رینولدز مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز ابعاد گردابه اولیه ناشی از باد کرونا کاهش یافته است. بنابراین، با توجه به شکل ۸ و جدول ۴، در پدیده الکتروهیدرودینامیک شار ورتیسیتی بی‌بعد با ابعاد گردابه‌ها رابطه مستقیم و از سوی دیگر با عدد رینولدز رابطه معکوس دارد. به عبارت دیگر، انحراف سیال در رینولدزهای پایین‌تر به سمت الکتروود جمع‌کننده، باعث تولید گردابه‌های قوی‌تر و حجیم‌تر در مجاورت الکتروود تزریق‌کننده می‌شود. به‌طور واضح مشخص است

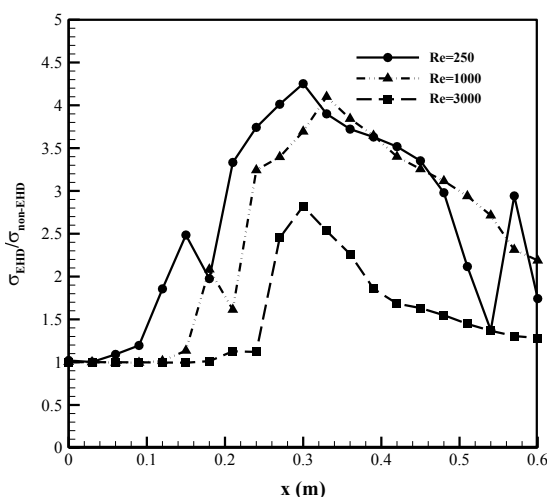


Fig. 8. Longitudinal evolution of the dimensionless absolute vorticity flux

شکل ۸: توزیع ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد ( $d=0.3$  m,  $V_0=18$  kV)

ارتفاع ۵ سانتی‌متری با نتایج عددی هاوت [۱۹] در شکل ۶ مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج عددی مطالعه حاضر با بیشینه خطای ۱۸٫۳ درصد با نتایج عددی این مرجع به طور قابل قبولی مطابقت دارند.

### ۷-۱- تأثیر عدد رینولدز جریان ورودی

خطوط جریان حاصل از اعمال ولتاژ ۱۸ کیلوولت به الکتروود تزریق‌کننده برای رینولدزهای مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در عدد رینولدزهای پایین‌تر، مادامی که مومنتم جریان ورودی کمتر است، تأثیر جریان ثانویه بر سیال و انحراف آن بیشتر می‌شود. همچنین، به منظور ارزیابی قدرت جریان ثانویه بر حسب عدد رینولدز جریان ورودی، توزیع طولی ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد در نواحی دارای گردابه، بیشینه است و با نزدیک شدن به ورودی و خروجی کانال، که تأثیر گردابه‌ها کاهش یافته است، مقدار آن کاهش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد در بالادست جریان از مقدار ۱ شروع شده و با نزدیک شدن به گردابه‌های ناشی از باد کرونا، افزایش می‌یابد. همچنین، ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد، به طوری که مقدار بیشینه شار ورتیسیتی بی‌بعد در اعداد رینولدز

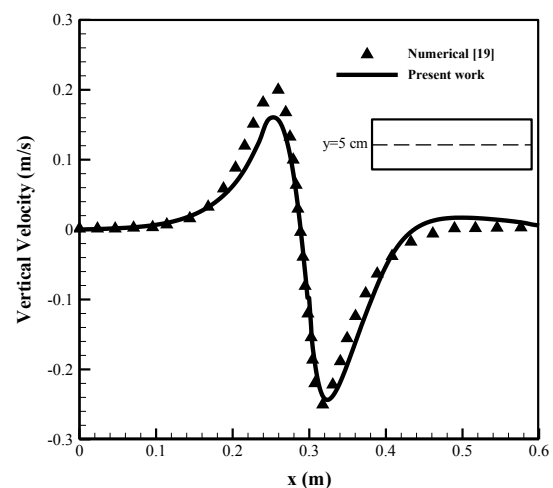


Fig. 6. Comparison for vertical component velocity at 5 cm from the grounded plate ( $V_0=18$  kV,  $U_\infty=0.3$  m/s)

شکل ۶: مقایسه مؤلفه سرعت در راستای  $y$  در  $y=5$  cm از صفحه جمع‌کننده، ( $V_0=18$  kV,  $U_\infty=0.3$  m/s)



الکتروود جمع‌کننده نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در این وضعیت تأثیر میدان الکتریکی بر جریان سیال بیشتر می‌شود. با افزایش ولتاژ اعمالی، مولکول‌های بیشتری از هوا یونیزه شده، بنابراین چگالی بار الکتریکی در محیط افزایش می‌یابد و در نتیجه انتظار می‌رود با افزایش چگالی بار الکتریکی در محیط، مقدار نیروی الکتریکی نیز افزایش یابد. این افزایش نیروی الکتریکی منجر به برهم زدن بیشتر جریان سیال می‌شود. همچنین با افزایش ولتاژ اعمالی، گردابه‌های ایجاد شده در فضای درون کانال حجیم‌تر و قوی‌تر می‌شود. دلیل این امر نیز افزایش قدرت و اثر میدان الکتریکی است که باعث می‌شود جریان سیال با شدت و حجم بیشتری به سمت صفحه متصل به زمین هدایت شود. خطوط جریان حاصل از افزایش ولتاژ اعمالی به الکتروود تزریق‌کننده در عدد رینولدز ۳۰۰۰ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با افزایش ولتاژ اعمالی، گستره بیشتری از درون کانال از جریان ثانویه تأثیر می‌پذیرد. دلیل این امر نیز افزایش قدرت و اثر میدان الکتریکی است که در واقع باعث می‌شود جریان سیال با شدت بیشتری به سمت صفحه متصل به زمین هدایت شود و گردابه اولیه و ثانویه ناشی از پدیده الکتروودینامیک حجیم‌تر گردند. بنابراین در جدول ۵ ابعاد گردابه‌های اولیه و ثانویه ناشی از محرک الکتروودینامیک بر حسب ولتاژ اعمالی مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ اعمالی به الکتروود تزریق‌کننده ابعاد گردابه‌های اولیه و ثانویه ناشی از باد کرونا افزایش یافته است.

با توجه به اینکه ولتاژ اعمالی پارامتر مؤثری در پدیده الکتروودینامیک و جریان ثانویه ناشی از آن می‌باشد، لازم است تأثیر آن بر قدرت جریان ثانویه و شار ورتیسیتی نیز بررسی شود. به عنوان معیار مناسبی از قدرت گردابه ایجاد شده، توزیع ورتیسیتی بر حسب ولتاژ اعمالی در عدد رینولدز ۳۰۰۰ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد با افزایش ولتاژ اعمالی قدرت

جدول ۴: ابعاد گردابه‌ها تابعی از عدد رینولدز ( $V_0=18 \text{ kV}$ )  
**Table 4. Dimensions of the recirculation zones based on the Reynolds number ( $V_0=18 \text{ kV}$ )**

ابعاد گردابه ثانویه		ابعاد گردابه اولیه		عدد رینولدز
$b'(\text{cm})$	$a'(\text{cm})$	$b(\text{cm})$	$a(\text{cm})$	
۲۵	۹٫۶	۱۳٫۶	۹٫۵	۲۵۰
۳۱٫۵	۷٫۳	۱۲	۸	۱۰۰۰
۱۹	۳	۱۰	۵	۳۰۰۰

که پدیده الکتروودینامیک 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.

همچنین، توزیع طولی شار ورتیسیتی بی‌بعد و ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد به ازای اعداد رینولدز مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. هر دو نمودار تا اطراف الکتروود تزریق‌کننده در حال افزایش هستند، زیرا در این ناحیه لایه مرزی توسط تداخل گردابه‌های اولیه و ثانویه حذف شده است [۳]. مقدار بیشینه هر دو پروفیل در ناحیه اطراف الکتروود تزریق‌کننده (ناحیه‌ای که تأثیر میدان الکتریکی بر جریان سیال بیشینه است) قرار دارد.

از طرف دیگر، رفتار  $\sigma_{EHD}/\sigma_{non\_EHD}$  و  $h_{EHD}/h_{non\_EHD}$  در  $x \approx 0,17\text{m}$  یعنی قبل از الکتروود تزریق‌کننده، به دلیل وجود گردابه‌های کوچک در جلوی گردابه اصلی اولیه، کمی متفاوت می‌باشد. همچنین، در پایین‌دست جریان  $0,6\text{m} \leq x \leq 0,3\text{m}$  یعنی بعد از الکتروود تزریق‌کننده، مقدار شار ورتیسیتی نسبت به بالادست جریان بیشتر می‌باشد و همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این ناحیه ضریب افزایش انتقال حرارت نیز نسبت به بالادست جریان، حدود ۲ الی ۳ برابر می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت افزایش  $h_{EHD}/h_{non\_EHD}$  به دلیل افزایش شار ورتیسیتی در این ناحیه می‌باشد.

#### ۷-۲- تأثیر ولتاژ اعمالی

در تحلیل پدیده الکتروودینامیک مادامی که ولتاژ اعمالی افزایش یابد، جریان کرونای تخلیه شده بین الکتروود تزریق‌کننده و

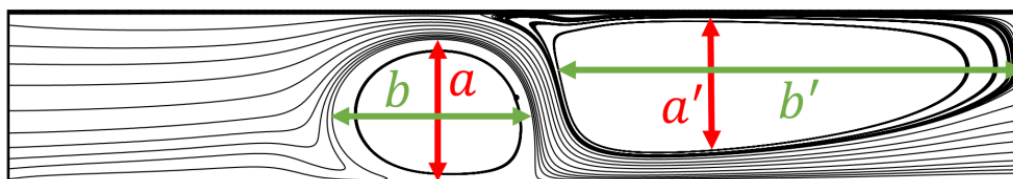
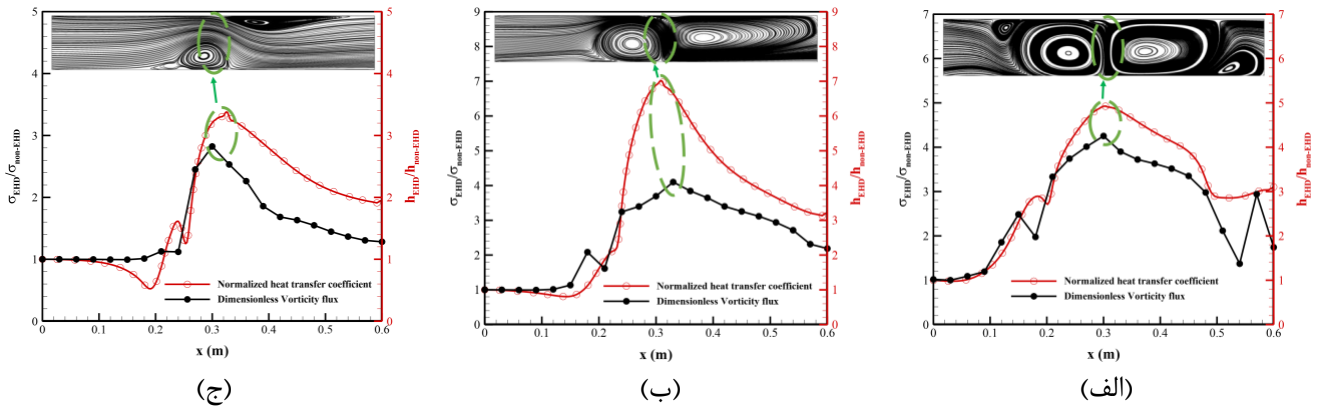


Fig. 9. Schematic view of the dimensions of recirculation zones

شکل ۹: شماتیکی از ابعاد نواحی گردابی



**Fig. 10. Longitudinal evaluation of dimensionless vorticity flux and normalized heat transfer coefficient ( $V_0=18$  kV), (a)  $Re=250$ , (b)  $Re=1000$ , (c)  $Re=3000$**

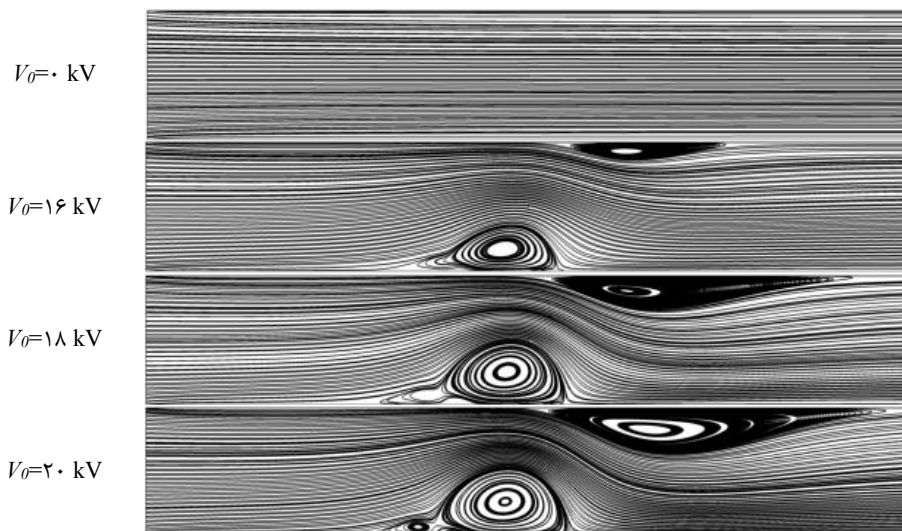
شکل ۱۰. توزیع طولی شار ورتیسیتی بی‌بعد و ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد در اعداد رینولدز مختلف ( $V_0=18$  kV) (الف)  $Re=250$  (ب)  $Re=1000$  (ج)  $Re=3000$

افزایش می‌یابد و در خروجی کانال که تأثیر گردابه‌ها کاهش یافته است، مقدار آن نیز کاهش می‌یابد. دلیل افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد در ناحیه وجود گردابه‌ها می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش ولتاژ اعمالی، ابعاد گردابه‌های ناشی از محرک الکتروهیدرودینامیک بزرگ‌تر شده و همچنین مقدار ورتیسیتی در این ناحیه نیز افزایش یافته است.

### ۳-۷- تأثیر آرایش الکتروود تزریق‌کننده

در این بخش، تأثیر موقعیت طولی الکتروود تزریق‌کننده بر شار ورتیسیتی و همچنین تأثیر قدرت جریان ثانویه بر ضریب افزایش انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. خطوط جریان حاصل از

جریان ثانویه افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش مقدار ورتیسیتی در نواحی تشکیل گردابه‌های ناشی از الکتروهیدرودینامیک می‌شود. با توجه به این شکل، انتظار می‌رود که مقدار شار ورتیسیتی در نواحی وجود گردابه‌های ناشی از الکتروهیدرودینامیک افزایش یابد. به همین دلیل، توزیع طولی شار ورتیسیتی بی‌بعد به ازای ولتاژ اعمالی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار بیشینه شار ورتیسیتی بی‌بعد در ولتاژ اعمالی ۱۶، ۱۸ و ۲۰ کیلوولت به ترتیب حدود ۲٫۴۲، ۲٫۸۲ و ۳٫۰۶ می‌باشد. همچنین، ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد در ورودی کانال، از مقدار ۱ شروع شده و با نزدیک شدن به گردابه‌های ناشی از باد کرونای



**Fig. 11. Airflow streamlines ( $d=0.3$  m,  $Re=3000$ )**

شکل ۱۱: خطوط جریان سیال ( $d=0.3$  m,  $Re=3000$ )

جدول ۶: شار ورتیسیتی بی‌بعد متوسط و ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد متوسط بر حسب موقعیت الکترود تزریق‌کننده ( $V_0=20 \text{ kV}$ ,  $Re=1000$ )

**Table 6. Averaged dimensionless vorticity flux and averaged normalized heat transfer coefficient for various longitudinal positions of the emitter electrode ( $V_0=20 \text{ kV}$ ,  $Re=1000$ )**

$\left(\frac{h_{EHD}}{h_{non\_EHD}}\right)$	$\left(\frac{\sigma_{EHD}}{\sigma_{non\_EHD}}\right)$	موقعیت الکترود تزریق‌کننده $d \text{ (cm)}$
۴٫۸۶	۲٫۹۸	۱۰
۴٫۳۹	۲٫۵۱	۳۰
۴٫۱۲	۲٫۳۳	۵۰

تزریق‌کننده وابسته است. اگرچه، مقدار بیشینه شار ورتیسیتی بی‌بعد در هر سه موقعیت الکترود تزریق‌کننده ثابت و برابر با ۴٫۴۸ می‌باشد، اما مقدار متوسط شار ورتیسیتی بی‌بعد به دلیل بهم ریختگی لایه مرزی متفاوت می‌باشد. همچنین ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد نیز رفتاری مشابه با شار ورتیسیتی بی‌بعد داشته و توزیع متفاوتی نسبت به آرایش الکترود تزریق‌کننده دارد. نتایج شار ورتیسیتی بی‌بعد متوسط و ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد متوسط بر حسب موقعیت الکترود تزریق‌کننده در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با نزدیک‌تر شدن موقعیت الکترود تزریق‌کننده به ورودی کانال، شار ورتیسیتی بی‌بعد متوسط و ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد متوسط افزایش یافته‌اند. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با نزدیک‌تر شدن موقعیت

جدول ۵. ابعاد گردابه‌ها تابعی از ولتاژ اعمالی ( $Re=3000$ )  
Table 5. Dimensions of the recirculation zones based on the applied voltage ( $Re=3000$ )

ابعاد گردابه ثانویه		ابعاد گردابه اولیه		ولتاژ اعمالی (kV)
$b' \text{ (cm)}$	$a' \text{ (cm)}$	$b \text{ (cm)}$	$a \text{ (cm)}$	
۱۲	۱٫۳	۹٫۴	۳	۱۶
۱۵	۱٫۸	۱۰	۴٫۵	۱۸
۲۴	۳٫۴	۱۱	۵٫۲	۲۰

تغییر مکان طولی الکترود تزریق‌کننده در ولتاژ اعمالی ۲۰ کیلوولت و عدد رینولدز ۱۰۰۰ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با تغییر مکان الکترود تزریق‌کننده، مکان تشکیل گردابه‌های ناشی از باد کرونا نیز تغییر کرده و در اطراف الکترود تزریق‌کننده رخ می‌دهند. لازم به ذکر است که با تغییر موقعیت طولی الکترود تزریق‌کننده، اندازه گردابه‌های اولیه اطراف الکترود تزریق‌کننده در موقعیت‌های مختلف تقریباً یکسان می‌ماند اما گردابه ثانویه کاملاً متغیر است. به منظور ارزیابی قدرت جریان ثانویه در آرایش‌های مختلف قرارگیری الکترود تزریق‌کننده، توزیع طولی ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد و ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، رفتار ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد کاملاً مشابه و وابسته به ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد می‌باشد. همچنین، ضریب افزایش شار ورتیسیتی کاملاً به موقعیت الکترود

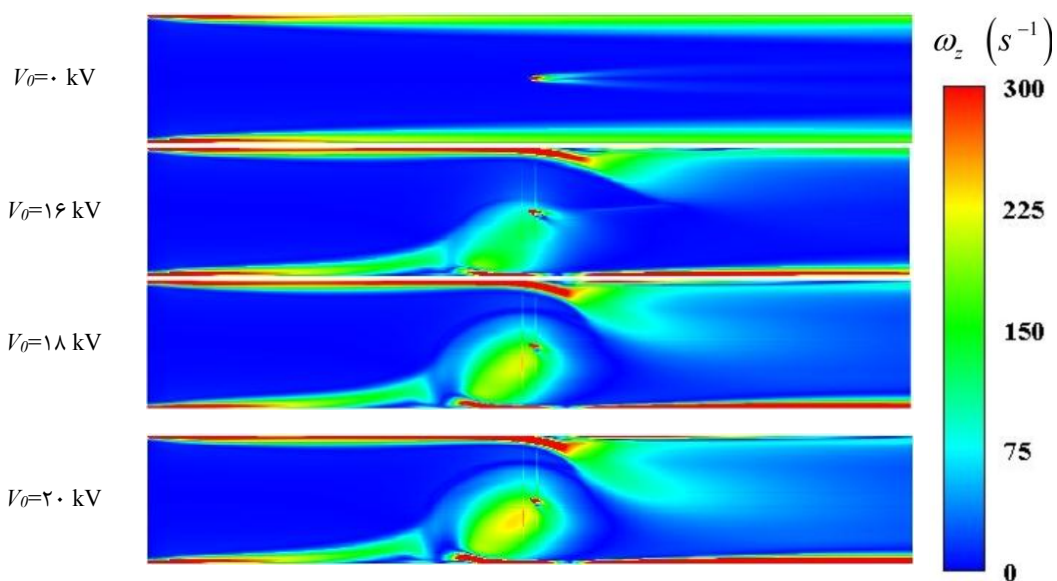


Fig. 12. Distribution of vorticity ( $d=0.3 \text{ m}$ ,  $Re=3000$ )

شکل ۱۲: توزیع ورتیسیتی ( $d=0.3 \text{ m}$ ,  $Re=3000$ )

در این مطالعه، تأثیر محرک الکترو هیدرودینامیک بر شار ورتیسیتی، به عنوان معیار قدرت جریان ثانویه، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی رابطه جریان سیال با قدرت جریان ثانویه و انتقال حرارت تحت اثر باد کرونا است. همچنین تأثیر پارامترهایی همچون عدد رینولدز، ولتاژ اعمالی و موقعیت الکترود تزریق کننده بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد در ورودی کانال، از مقدار ۱ شروع شده و با نزدیک شدن به گردابه‌های ناشی از باد کرونا، افزایش می‌یابد و در خروجی کانال، که تأثیر گردابه‌ها کاهش یافته است، مقدار آن نیز کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده با افزایش عدد رینولدز جریان ورودی، ابعاد گردابه‌های اولیه ناشی از باد کرونا و شار ورتیسیتی بی‌بعد کاهش می‌یابد، به طوری که مقدار بیشینه شار ورتیسیتی بی‌بعد در ولتاژ اعمالی ۱۸ کیلوولت برای اعداد رینولدز ۲۵۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ به ترتیب حدود ۴٫۱، ۴٫۲۵ و ۲٫۸۲ می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ، یونیزاسیون حاصل از آن گردابه‌های قوی‌تر و حجیم‌تری را تولید می‌کند که باعث افزایش ابعاد گردابه‌های اولیه و ثانویه ناشی از باد کرونا و شار ورتیسیتی بی‌بعد می‌شود، به طوری که مقدار بیشینه شار ورتیسیتی بی‌بعد در عدد رینولدز ۳۰۰۰ برای ولتاژ اعمالی ۱۶، ۱۸ و ۲۰ کیلوولت به ترتیب حدود ۲٫۴۲، ۲٫۸۲ و ۳٫۰۶ می‌باشد. به منظور ارزیابی تأثیر موقعیت الکترود تزریق کننده بر شار ورتیسیتی و تأثیر آن بر ضریب افزایش انتقال حرارت، آرایش‌های مختلفی از الکترود تزریق کننده در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که شار ورتیسیتی بی‌بعد کاملاً به موقعیت الکترود تزریق کننده وابسته است، به نحوی که با نزدیک شدن الکترود به ورودی کانال ( $d=10\text{ cm}$ )

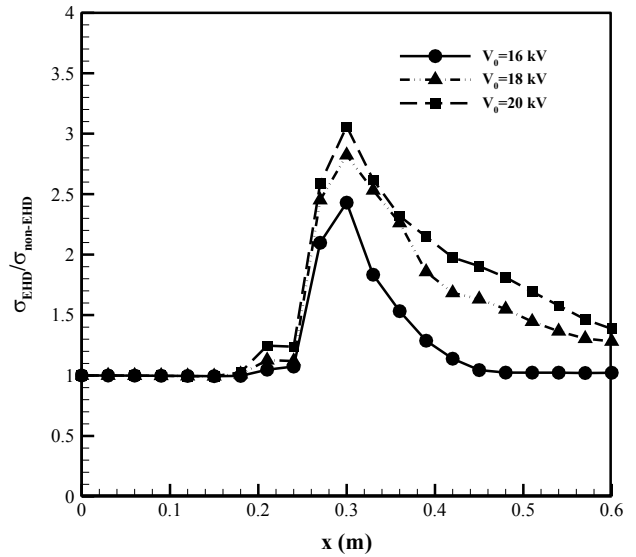


Fig. 13. Longitudinal evolution of the dimensionless absolute vorticity flux ( $d=0.3\text{ m}$ ,  $Re=3000$ )

شکل ۱۳: توزیع ضریب افزایش شار ورتیسیتی بی‌بعد ( $d=0.3\text{ m}$ ,  $Re=3000$ )

الکترود تزریق کننده به ورودی کانال، گردابه‌های ناشی از باد کرونا لایه مرزی را در نزدیک ورودی کانال بهم ریخته و بخش بیشتری از کانال تحت تأثیر جریان ثانویه می‌باشد. همان گونه که مشخص است، برای موقعیت  $d=10\text{ cm}$ ، مقدار متوسط شار ورتیسیتی بی‌بعد و ضریب افزایش انتقال حرارت نسبت به سایر حالات بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر اینکه اعمال میدان الکتریکی تأثیر بسزایی در افزایش قدرت جریان ثانویه و انتقال حرارت دارد، نحوه قرارگیری الکترودهای تزریق کننده هم به طور چشمگیری بر مقدار شار ورتیسیتی تأثیر می‌گذارد.

#### ۸- نتیجه گیری

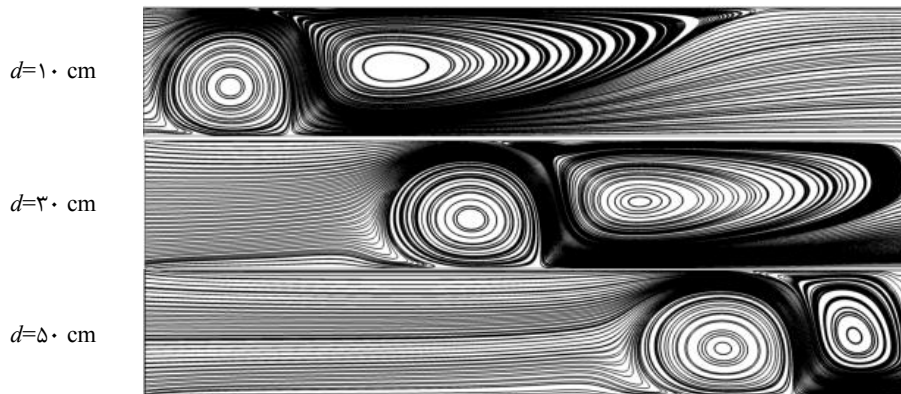


Fig. 14. Airflow streamlines for various longitudinal positions of the emitter electrode ( $V_0=20\text{ kV}$ ,  $Re=1000$ )

شکل ۱۴: خطوط جریان سیال برای موقعیت‌های طولی مختلف الکترود تزریق کننده ( $V_0=20\text{ kV}$ ,  $Re=1000$ )

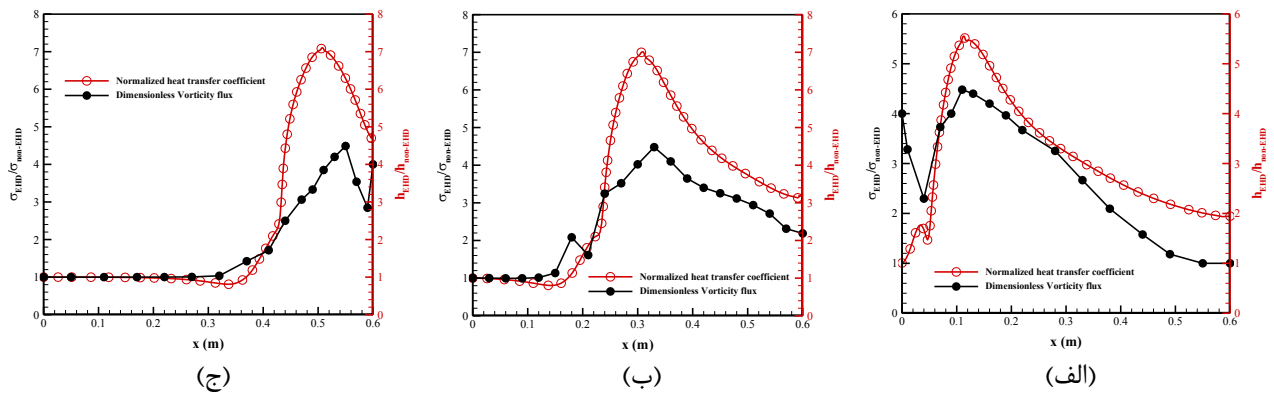


Fig. 15. Longitudinal evaluation of dimensionless vorticity flux and normalized heat transfer coefficient for various longitudinal positions of the emitter electrode ( $V_0=20$  kV,  $Re=1000$ ), (a)  $d=10$  cm, (b)  $d=30$  cm, (c)  $d=50$  cm

شکل ۱۵: توزیع طولی شار ورتیسیتی بی‌بعد و ضریب افزایش انتقال حرارت بی‌بعد برای موقعیت‌های طولی مختلف تزریق‌کننده

$d=50$  cm (ج)  $d=30$  cm (ب)  $d=10$  cm (الف) ( $V_0=20$  kV,  $Re=1000$ )

فشار ( $N/m^2$ )	$P$	نسبت به موقعیت الکترود نزدیک به خروجی کانال ( $d=50$ cm)، شار ورتیسیتی بی‌بعد متوسط و ضریب افزایش انتقال حرارت متوسط، به ترتیب $27.9$ و $17.9$ درصد افزایش می‌یابند.
شار حرارتی ( $W/m^2$ )	$q''$	
شعاع الکترود تزریق‌کننده (m)	$r_e$	
عدد رینولدز	$Re$	
سطح مقطع ( $m^2$ )	$S$	
زمان (s)	$t$	
دما (K)	$T$	
سرعت ( $m/s$ )	$u_i$	
سرعت متوسط ( $m/s$ )	$U$	
پتانسیل الکتریکی (V)	$V$	
	<b>علائم یونانی</b>	
نفوذ حرارتی ( $m^2/s$ )	$\alpha$	
نفوذ حرارتی آشفتنگی ( $m^2/s$ )	$\alpha_t$	
یون‌پذیری هوا ( $m^2/V.s$ )	$\beta$	
نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتنگی (W)	$\varepsilon$	
ضریب گذردهی الکتریکی (F/m)	$\varepsilon_e$	
نفوذ الکتریکی ( $1/\Omega.m$ )	$\gamma$	
زاویه بین خط عمودی و خط واصل از الکترود تزریق‌کننده ( $^\circ$ )	$\theta$	
لزجت دینامیکی ( $kg/m.s$ )	$\mu$	
لزجت دینامیکی آشفتنگی ( $kg/m.s$ )	$\mu_t$	
چگالی ( $kg/m^3$ )	$\rho$	
چگالی حجمی بار الکتریکی ( $C/m^3$ )	$\rho_c$	
شار ورتیسیتی بی‌بعد	$\sigma$	
ورتیسیتی ( $s^{-1}$ )	$\omega_z$	
	<b>زیرنویس</b>	
آشفته	$t$	
سطح دیواره	$wall$	
	<b>علائم انگلیسی</b>	
	$a$	ارتفاع گرداب اولیه (m)
	$a'$	عرض گرداب اولیه (m)
	$b$	ارتفاع گرداب ثانویه (m)
	$b'$	عرض گرداب ثانویه (m)
	$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $J/kg.K$ )
	$C_\mu$	ضریب ثابت مدل آشفتنگی $k-\varepsilon$
	$d$	فاصله الکترود تزریق‌کننده از ورودی (m)
	$E$	میدان الکتریکی (V/m)
	$F_e$	نیروی حجمی الکتروهیدرودینامیک ( $N/m^3$ )
	$h_x$	ضریب انتقال حرارت ( $W/m^2.K$ )
	$h_{EHD}/h_{non-EHD}$	ضریب افزایش انتقال حرارت
	$H$	ارتفاع کانال (m)
	$J$	شار ورتیسیتی متوسط ( $s^{-1}$ )
	$J_e$	چگالی جریان الکتریکی ( $A/m^2$ )
	$k$	انرژی جنبشی آشفتنگی (J)
	$K$	ضریب هدایت حرارتی ( $W/m.K$ )
	$L$	طول کانال (m)
	$n$	بردار عمود بر سطح



- of using various electrode arrangements for amplifying the EHD enhanced heat transfer in a smooth channel, *Journal of Electrostatics*, 71(4) (2013) 656-665.
- [10] M. Peng, T.-H. Wang, X.-D. Wang, Effect of longitudinal electrode arrangement on EHD-induced heat transfer enhancement in a rectangular channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93 (2016) 1072-1081.
- [11] T.-H. Wang, M. Peng, X.-D. Wang, W.-M. Yan, Investigation of heat transfer enhancement by electrohydrodynamics in a double-wall-heated channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113 (2017) 373-383.
- [12] L.-M. Chang, L.-B. Wang, K.-W. Song, D.-L. Sun, J.-F. Fan, Numerical study of the relationship between heat transfer enhancement and absolute vorticity flux along main flow direction in a channel formed by a flat tube bank fin with vortex generators, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8) (2009) 1794-1801.
- [13] K.-W. Song, L.-B. Wang, The effectiveness of secondary flow produced by vortex generators mounted on both surfaces of the fin to enhance heat transfer in a flat tube bank fin heat exchanger, *Journal of Heat Transfer*, 135(4) (2013) 041902.
- [14] T. Lemenand, C. Habchi, D. Della Valle, H. Peerhossaini, Vorticity and convective heat transfer downstream of a vortex generator, *International Journal of Thermal Sciences*, 125 (2018) 342-349.
- [15] H. Moayedi, N. Amanifard, H.M. Deylami, Evaluation of using micropolar fluid approach for the EHD-enhanced forced convection through a rectangular channel using multiple electrode arrangements, *Applied Thermal Engineering*, (2019) 113857.
- [16] K. Adamiak, P. Atten, Simulation of corona discharge in point-plane configuration, *Journal of electrostatics*, 61(2) (2004) 85-98.
- [17] H. Moayedi, N. Amanifard, H.M. Deylami, F. Dolati, Numerical investigation of using micropolar fluid model for EHD flow through a smooth
- [1] P.M. Le, D.V. Papavassiliou, A physical picture of the mechanism of turbulent heat transfer from the wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(21-22) (2009) 4873-4882.
- [2] C. Habchi, T. Lemenand, D. Della Valle, L. Pacheco, O. Le Corre, H. Peerhossaini, Entropy production and field synergy principle in turbulent vortical flows, *International Journal of Thermal Sciences*, 50(12) (2011) 2365-2376.
- [3] C. Habchi, T. Lemenand, D.D. Valle, H. Peerhossaini, Turbulence behavior of artificially generated vorticity, *Journal of Turbulence*, (11) (2010) N36.
- [4] F. Dolati, N. Amanifard, H. Mohaddes Daylami, K. Yazdani, Numerical analysis of the electric field effect on mass transfer through a moist object, *Modares Mechanical Engineering*, 17(1) (2017) 383-393. (in Persian).
- [5] Y. Liao, Z. Feng, X. Zhou, Predicting the pumping effects of electrohydrodynamic (EHD) gas pumps by numerical simulations and quantitative pressure drop vs. flow rate curves, *Journal of Electrostatics*, 96 (2018) 160-168.
- [6] H. Deylami, N. Amanifard, S. Hosseini-zhad, F. Dolati, Numerical investigation of the wake flow control past a circular cylinder with Electrohydrodynamic actuator, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 66 (2017) 71-80.
- [7] F.S. Taghavi, N. Amanifard, H. Deylami, F. Dolati, Numerical investigation of collecting wire electrode effect on the flow field and heat transfer with electrohydrodynamic actuator, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 6 (2016) 201-213. (in Persian).
- [8] S.S.N. Ayuttaya, C. Chakranond, P. Rattanadecho, Numerical analysis of electric force influence on heat transfer in a channel flow (theory based on saturated porous medium approach), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64 (2013) 361-374.
- [9] H.M. Deylami, N. Amanifard, F. Dolati, R. Kouhikamali, K. Mostajiri, Numerical investigation



- Applied Physics, 34(3) (2006) 215-223.
- [19] M. Havet, Effect of process parameters on the EHD airflow, Journal of Electrostatics, 67(2-3) (2009) 222-227.
- channel, Journal of Electrostatics, 87 (2017) 51-63.
- [18] N. Oussalah, Y. Zebboudj, Finite-element analysis of positive and negative corona discharge in wire-to-plane system, The European Physical Journal-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

H. Moayedi, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, Numerical Analysis of Secondary Flow Strength Induced by Electrohydrodynamic Actuator Through a Smooth Channel, Amirkabir J. Mech Eng., 53(3) (2021) 1401- 1416.

DOI: [10.22060/mej.2019.16765.6435](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16765.6435)



