

تحلیل عددی میدان جریان و انتقال حرارت تحت تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیک با استفاده از مدل میکروپولار

حسام مویدی^۱

دانشجوی دکترا

نیما امانی فرد^۲

دانشیار

حامد محدث دیلمی^۳

استادیار

در تحقیق حاضر تأثیر آرایش الکتروود تزریق کننده بر میزان اثرگذاری پدیده الکتروهیدرودینامیک در یک کانال مسطح با استفاده از مدل سیال میکروپولار پرداخته شده است. تأثیر موقعیت طولی الکتروود تزریق کننده، فاصله بین الکتروود تزریق کننده و الکتروود جمع کننده و نیز آرایش طولی بررسی شده است. همچنین، نتایج حاصل از مدل میکروپولار با نتایج مدل آشفتگی کی-اپسیلون مقایسه شده است. نتایج عددی نشان می دهد که برای هر نوع جریان تحت تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیک با شرایط مشخص، مقدار مناسب پارامتر مادی برای موقعیت های طولی گوناگون دارای مقدار ثابتی می باشد. همچنین این پارامتر با کاهش فاصله بین الکتروود تزریق کننده و جمع کننده، افزایش می یابد.

واژه های راهنما: الکتروهیدرودینامیک، مدل میکروپولار، پارامتر مادی، بررسی عددی

۱- مقدمه

استفاده از پدیده الکتروهیدرودینامیک^۴ به عنوان یکی از روش های فعال به منظور کنترل جریان و بهبود انتقال حرارت از گذشته تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. در این پدیده به علت ایجاد جریان ثانویه ای به نام باد کرونا^۵ می توان نرخ انتقال حرارت را افزایش داد. تخلیه کرونا بر اساس اعمال ولتاژ بالا به یک الکتروود تزریق کننده^۶ و یک الکتروود جمع کننده^۷ به وجود می آید [۱]. در این پدیده میدان الکتریکی در اطراف الکتروود تزریق کننده موجب یونیزاسیون هوا می شود و یون های هم نام با الکتروود تزریق کننده بر اثر نیروی الکتریکی به سمت الکتروود جمع کننده حرکت می کنند و در مسیر حرکت خود با برخورد با ذرات خنثی هوا موجب انتقال مومنتم به این ذرات شده و در نتیجه باد کرونا تولید می شود.

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان hesam.moayedi@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان namanif@guilan.ac.ir

^۳ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان hmohaddesd@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۰۷، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۴

^۴ Electrohydrodynamic

^۵ Corona wind

^۶ Emitting electrode

^۷ Collector electrode

باد کرونا با برهم زدن الگوی جریان اصلی سیال، موجب کاهش لایه مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی می‌شود و در نتیجه نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. پدیده الکترو هیدرودینامیک در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. اکثر مطالعات به صورت تجربی [۲-۴] و یا عددی بر مبنای مدل‌سازی جریان کاملاً آشفته [۵-۱۰] صورت گرفته است.

لئونارد و همکاران [۲] و داویدسون و شاقنسی [۳] با استفاده از جریان سنج سیم داغ^۱ مشاهده کردند که به دلیل انحراف ذرات به سمت صفحات جمع‌کننده، نمی‌توان به راحتی اطراف سیم الکتروود تزریق‌کننده را مشاهده کرد و سرعت و دیگر مشخصه‌های جریان در این ناحیه به درستی قابل تعیین نمی‌باشد. لئونارد و همکاران [۲] سرعت متوسط و شدت آشفتگی نوسانات جریان را برای دو نوع تخلیه میدان الکتریکی منفی و مثبت اندازه‌گیری کردند. آن‌ها نشان دادند که برای تخلیه منفی میدان الکتریکی، سرعت متوسط بدون تغییر و شدت آشفتگی افزایش می‌یابد. اما برای تخلیه مثبت، شدت آشفتگی در مرکز کانال کاهش خواهد داشت. همچنین، کالیو و استوک [۴] برای بررسی سرعت جریان از لیزر سنج دوپلر^۲ استفاده کردند. با اینکه این روش امکان اندازه‌گیری در اطراف الکتروود تزریق‌کننده را می‌دهد، اما داده‌های اندازه‌گیری شده برای سرعت میدان سیال نمی‌باشد، بلکه برای سرعت ذرات است، بنابراین سرعت تعیین شده برای سیال قابل اعتماد نیست.

سولدتی و بانرجی [۵] با روش شبیه‌سازی عددی مستقیم^۳ پدیده الکترو هیدرودینامیک درون یک کانال را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که آشفتگی جریان اصلی سیال و آشفتگی ناشی از میدان الکتریکی بر یکدیگر تأثیر دارند. اگرچه روش شبیه‌سازی عددی مستقیم یک روش مدل‌سازی قدرتمند برای بررسی میدان جریان آشفته و ساختار جریان می‌باشد، اما این روش هزینه و زمان محاسباتی زیادی نیاز دارد. بنابراین بیشتر مطالعات عددی برای شبیه‌سازی جریان الکترو هیدرودینامیک از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌کنند [۶-۱۱]. بررسی این مطالعات نشان‌دهنده این است که کارایی این پدیده به پارامترهای همچون عدد رینولدز [۱۱-۱۰، ۸-۶]، ولتاژ اعمالی [۶-۱۱، ۹-۶]، تعداد الکتروود [۶-۱۰] و همچنین فاصله بین الکتروودها از یکدیگر وابسته است [۶-۱۰]. احمدو و هاوت [۶] و دیلمی و همکاران [۷] انتقال حرارت در یک کانال مسطح را در حضور پدیده الکترو هیدرودینامیک به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده آن است که تأثیر پدیده الکترو هیدرودینامیک با افزایش ولتاژ اعمالی و کاهش شعاع الکتروود تزریق‌کننده، در اعداد رینولدز پایین‌تر بیشتر بوده و موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود. همچنین انتخاب آرایش مناسب الکتروودها و فاصله مناسب مابین آن‌ها، تأثیر قابل توجهی بر افزایش انتقال حرارت دارد. کاساپاناند و کیاتسیرپروت [۸] به بررسی عددی تأثیر پدیده الکترو هیدرودینامیک بر انتقال حرارت جریان آرام در داخل کانال موجی شکل پرداخته‌اند. بررسی‌های عددی آن‌ها حاکی از برهم‌خوردگی الگوی جریان و لایه مرزی حرارتی تحت اثر میدان الکتریکی گسترش یافته در کانال است. همچنین نشان دادند که بهبود انتقال حرارت حاصل از الکترو هیدرودینامیک با کاهش عدد رینولدز و فاصله مابین الکتروودها و سطح دیواره افزایش یافته و به آرایش الکتروود، تعداد الکتروودها، هندسه کانال موجی شکل و ابعاد موج وابسته است. آن‌ها همچنین آرایش الکتروود بهینه را با در نظر گرفتن دو پارامتر میزان افزایش انتقال حرارت و افت فشار در کانال به دست آوردند.

¹ Hot wire anemometry

² Laser doppler anemometry

³ Direct Numerical Simulation

آیوتا و همکاران [۹]، تأثیر آرایش‌های مختلف الکترودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده را بر توزیع میدان الکتریکی و میدان جریان به صورت عددی تحلیل نمودند. آن‌ها نشان دادند که آرایش مختلف الکترودها منجر به شکل‌گیری الگوهای متفاوت در جریان‌های چرخشی می‌شود. همچنین میزان شدت جریان چرخشی با افزایش نیروی اینرسی حاصل از جریان ورودی به کانال، کاهش می‌یابد. پنگ و همکاران [۱۰] انتقال حرارت در یک کانال مسطح در حضور میدان الکتریکی را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در یک عدد رینولدز مشخص، موقعیت طولی الکترودها تزریق‌کننده بر ضریب انتقال حرارت جابجایی بسیار مؤثر است و با نزدیک‌تر شدن الکترودها به ورودی کانال، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در واقع ارتباطی بهینه بین موقعیت الکترودها تزریق‌کننده نسبت به ورودی کانال و فاصله مناسب بین الکترودها برای چیدمان طولی وجود دارد. همچنین، نتایج آن‌ها حاکی از آن است که در صورت افزایش تعداد الکترودها از تعدادی مشخص، مقدار ضریب انتقال حرارت نسبت به حالت چیدمان بهینه‌ی الکترودها افت می‌کند.

ملکی و دامرون‌گلرد [۱۱] تأثیر پدیده الکتروهایدرودینامیک بر بهبود انتقال حرارت در کانال‌های مربعی را بررسی نمودند. آن‌ها برای بررسی لزوم استفاده از مدل‌های آشفتگی برای شبیه‌سازی جریان آرام داخل کانال با محرک الکتروهایدرودینامیک، نتایج حاصل از دو مدل آرام و آشفته را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ و نتایج تجربی مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل جریان آرام، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک را به درستی پیش‌بینی نمی‌کند در حالی که نتایج مربوط به مدل‌های آشفتگی از جمله مدل کی-امگا از تطابق مطلوبی با نتایج شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و نتایج تجربی برخوردار است. این نتیجه سؤال اصلی را برای این تحقیق به وجود می‌آورد که "چرا جریان‌های الکتروهایدرودینامیک حتی زمانی که جریان اصلی در الکتروهایدرودینامیک به صورت هیدرولیکی آرام است، با مدل‌های کاملاً آشفته شبیه‌سازی می‌شوند؟" در پاسخ به این پرسش، روش تانسور پادمتقارن و سیالات میکروپولار، به‌ویژه مدل سیال میکروپولار می‌تواند یک روش جایگزین مناسب برای شبیه‌سازی پدیده الکتروهایدرودینامیک باشد [۱۲].

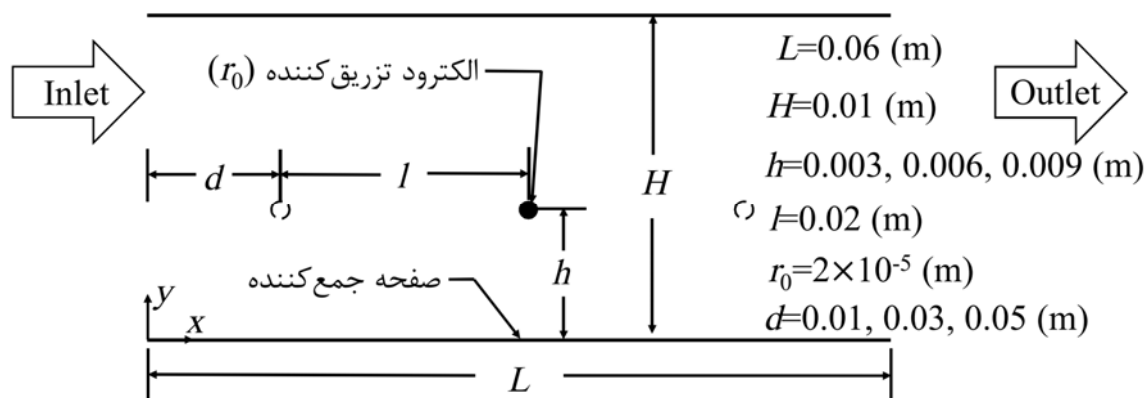
موییدی و همکاران [۱۳] از مدل میکروپولار برای شبیه‌سازی انتقال حرارت در یک کانال صاف تحت تأثیر محرک الکتروهایدرودینامیک در محدوده رژیم جریان آرام استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پارامتر مادی $(K\omega/\mu)$ در مدل میکروپولار نقش مهمی ایفا می‌کند و این پارامتر کاملاً به عدد رینولدز و ولتاژ اعمالی وابسته است. بررسی‌های گسترده‌ای روی نظریه سیالات میکروپولار توسط لوکاشیوچ [۱۴] و ارینگن [۱۵] انجام شده است. تئوری سیالات میکروپولار اثرات چرخشی محلی و تنش‌های پادمتقارن را به عنوان یک مدل ریاضی نشان می‌دهد و زمانی که نظریه‌ی کلاسیک مایعات نیوتنی ناکارآمد است، می‌توان برای توضیح ویژگی‌های جریان از تئوری فوق استفاده نمود. اسواینا و همکاران [۱۶] جریان سیال میکروپولار روی صفحه عمودی نفوذپذیر را با روش عددی المان محدود تحلیل کردند. آن‌ها اثر تابش حرارتی و میدان مغناطیسی عرضی بر انتقال حرارت ترکیبی جریان سیال میکروپولار در برخورد با نقطه رکود بر صفحه نفوذپذیر با مکش ثابت را بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نیروی میدان مغناطیسی و جابجایی ترکیبی، سرعت جریان افزایش و دما و میکروچرخش کاهش می‌یابند.

¹ Large Eddy Simulation

ساندپ و سولوپانا [۱۷] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی، انتقال جرم و واکنش شیمیایی برای جریان ناپایای لایه مرزی یک سیال میکروپولار بر روی یک ورقه کششی با در نظر گرفتن اثر اتلاف لزجی و وجود میدان مغناطیسی را مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند با افزایش پارامترهای سیال میکروپولار، سرعت و دما نیز افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش نیروی میدان مغناطیسی و واکنش شیمیایی، ضریب اصطکاک و انتقال جرم افزایش و عدد ناسلت کاهش می‌یابد. با توجه به پیش‌بینی نامناسب مدل جریان آرام در جریان‌های تحت تأثیر محرک الکتروهایدرودینامیک [۱۱] و عدم استفاده از یک مدل مناسب برای بررسی و شبیه‌سازی حرکت سیال در این نوع جریان‌ها، به‌خصوص در جریان آرام درون کانال با اعداد رینولدز پایین، هدف از مطالعه حاضر استفاده از مدل سیال میکروپولار برای شبیه‌سازی پدیده الکتروهایدرودینامیک و بررسی تأثیر موقعیت تزریق کننده بر پارامترهای این مدل می‌باشد. همچنین برای بررسی صحت و دقت نتایج حاضر، نتایج مدل میکروپولار با نتایج مربوط به شبیه‌سازی مدل جریان کاملاً آشفتگی-پسیلون استاندارد نیز مقایسه شده است.

۲- هندسه و خواص فیزیکی مسئله

نمای شماتیک هندسه دو بعدی مسئله مورد نظر، ابعاد به کار رفته و مکان‌های قرارگیری الکترو تزریق کننده و جمع کننده در شکل (۱) نشان داده شده است. فاصله بین اولین الکترو تزریق کننده نسبت به ورودی کانال و همچنین فاصله بین دو الکترو تزریق کننده به ترتیب با d و l تعریف می‌شود. علاوه بر این، فاصله بین الکترو تزریق کننده و صفحه جمع کننده با h نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای شماتیک از دامنه محاسباتی

جدول ۱- خواص سیال

مقدار	پارامتر
1.225 kg/m^3	چگالی (ρ)
0.0242 W/m K	ضریب هدایت حرارتی (K)
$2e-04 \text{ m}^2/\text{V s}$	ضریب یون پذیری (β)
$8.85e-12 \text{ F/m}$	ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ_s)
1006.43 J/kg K	ظرفیت گرمای ویژه (c_p)
$1.789e-05 \text{ kg/m s}$	ویسکوزیته دینامیکی (μ)

به منظور یافتن تأثیر موقعیت الکتروود تزریق کننده بر پارامتر مادی مدل میکروپولار، الکتروود تزریق کننده در چند مکان مختلف قرار داده شده است. هوا با سرعت مشخص از سمت چپ وارد کانال می شود و از سمت دیگر کانال خارج می شود. خواص فیزیکی سیال نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

۳- معادلات حاکم

پدیده الکتروویدرودینامیک توسط معادلات پایه الکتروستاتیک، جریان سیال و انرژی تحلیل می شود. یکی از دلایل پیچیدگی این پدیده، کوپل بودن این معادلات با یکدیگر است. برای محاسبه اثر میدان الکتریکی بر جریان سیال، ابتدا باید نیروی حاصل از اعمال میدان الکتریکی محاسبه و سپس به صورت یک نیروی حجمی به معادلات حرکت سیال افزوده شود.

۳-۱- معادلات میدان الکتریکی

نیروی حجمی اعمال شده توسط میدان الکتریکی بر میدان جریان سیال به صورت زیر می باشد [۷]:

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

در رابطه (۱) جمله اول سمت راست، نیروی کولمب^۱ است و همواره با اعمال میدان الکتریکی به یونها ایجاد می شود. این نیرو در همه کاربردهای الکتروویدرودینامیکی وجود دارد و در سیالات تکفازی نیروی غالب به شمار می رود. جملات دوم و سوم رابطه (۱) به ترتیب معرف نیروی دی الکتروفوریک^۲ و نیروی الکترواسترکتیو^۳ است که به دلیل ثابت بودن ضریب گذردهی الکتریکی برای سیال تراکم ناپذیر هوا صرف نظر می شوند [۷]. بنابراین تنها مؤلفه مؤثر در این پدیده، نیروی کولمب خواهد بود. به منظور تعیین نیروی حجمی ناشی از اعمال میدان الکتریکی و اضافه کردن آن به معادلات مومنتم، از معادلات پتانسیل الکتریکی و بقای جریان الکتریکی به عنوان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی، به صورت زیر استفاده می شود [۱۰]:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_i^2} = -\frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \frac{\partial J_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، J چگالی جریان الکتریکی است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$J_i = \rho_c \beta E_i + \rho_c u_i - D_e \frac{\partial \rho_c}{\partial x_i} \quad (4)$$

که در این رابطه، شدت میدان الکتریکی از رابطه (۵) به دست می آید.

$$E_i = -\frac{\partial V}{\partial x_i} \quad (5)$$

¹ Coulomb force

² Dielectrophoretic force

³ Electrostrictive force

سه عبارت سمت راست معادله (۴) به ترتیب تحرک یونی، جابه‌جایی و هدایت الکتریکی نامیده می‌شوند. به دلیل بالاتر بودن مرتبه بزرگی تحرک یونی نسبت به جابه‌جایی و هدایت الکتریکی، از عبارتهای دوم و سوم صرف‌نظر می‌شود. با اعمال فرضیات فوق و ترکیب روابط (۳) و (۴)، معادله بقای جریان الکتریکی به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\rho_c \beta \frac{\partial V}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (6)$$

روابط (۲)، (۵) و (۶) معادلات اساسی حاکم بر میدان الکتریکی می‌باشند که به منظور تعیین نیروی کولمب به‌طور همزمان حل می‌گردند.

۳-۲- معادلات مدل میکروپولار

معادلات حاکم بر میدان جریان و انتقال حرارت برای مدل سیال میکروپولار با فرض جریان تراکم‌ناپذیر، دوبعدی، آرام و پایا که تحت تأثیر نیروی حجمی ناشی از میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، بر اساس تئوری سیالات میکروپولار ارینگن به صورت زیر بیان می‌شود [۱۲]:

پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (7)$$

مومنتم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + (\mu + \kappa_\omega) \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \kappa_\omega \varepsilon_{ijk} \left(\frac{\partial \omega_k}{\partial x_j} \right) + F_{ei} \quad (8)$$

مومنتم زاویه‌ای:

$$j \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega_i u_j) \right] = -2\kappa_\omega \omega_i + \kappa_\omega \varepsilon_{ijk} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) + \gamma \left(\frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \quad (9)$$

انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

در رابطه (۸)، F_{ei} بیانگر نیروی کولمب و در رابطه (۹)، κ_ω ویسکوزیته میکرو چرخشی است. ویسکوزیته میکرو چرخشی یک ویژگی سیال است که تعیین‌کننده نرخ اختلاف مومنتم زاویه‌ای نسبت به حالت تعادل می‌باشد. در مطالعه حاضر، κ_ω مقدار ثابتی ندارد، زیرا این پارامتر به‌طور کامل وابسته به جریان و نیروهای حاصل از میدان الکتریکی می‌باشد و باید در تحلیل عددی برای هر حالت خاص تنظیم گردد. نسبت ویسکوزیته میکرو چرخشی به ویسکوزیته دینامیکی (κ_ω/μ) در مدل میکروپولار، پارامتر مادی نامیده شده است. همچنین، j چگالی میکرواینرسی و γ ویسکوزیته گرادیان چرخش می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۲، ۱۳]:

$$j = L_c^2 \quad (11)$$

$$\gamma = \left(\mu + \frac{\kappa_\omega}{2} \right) j \quad (12)$$

در رابطه (۱۱)، L_c بیانگر طول مشخصه کانال می‌باشد.

۳-۳- معادلات مدل آشفتگی کی-اِپسیلون استاندارد

به منظور تحلیل میدان جریان متأثر از محرک الکترو هیدرودینامیک اغلب از مدل آشفتگی دو معادله‌ای کی-اِپسیلون استاندارد استفاده می‌شود [۱، ۶، ۷، ۱۰].

مومنتم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_{ei} \quad (13)$$

انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(K + \frac{\mu_t c_p}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (14)$$

در رابطه (۱۳)، F_{ei} بیانگر نیروی کولمب می‌باشد. در روابط (۱۳) و (۱۴)، μ_t لزجت آشفتگی می‌باشد که در مدل کی-اِپسیلون استاندارد به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، k انرژی جنبشی آشفتگی و ε نرخ پراکندگی انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشند که با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) تعیین می‌شوند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \right] \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \varepsilon \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \right] \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (17)$$

همچنین اعداد ثابت معادلات کی-اِپسیلون استاندارد به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۸]:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (18)$$

۴- شرایط مرزی

در ورودی کانال، هوا دارای سرعت یکنواخت و دمای مشخص می‌باشد. شرط فشار ثابت در مرز خروجی در نظر گرفته شده است. دیواره‌های بالا و پایین به ترتیب به صورت آدیاباتیک و شار حرارتی ثابت و همه مرزهای جامد دارای شرط عدم لغزش می‌باشند. شرایط مرزی مورد نظر در جدول (۲) ذکر شده است. همچنین شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی در کل دامنه محاسباتی در جدول (۳) نشان داده 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 می‌آید. در این مطالعه از فرضیه کاپتزوف و قانون پیک به منظور تعیین چگالی بار الکتریکی استفاده شده است. براساس این فرضیه، چگالی بار الکتریکی بر روی الکتروود تزریق کننده حدس زده می‌شود و میدان الکتریکی محاسبه و سپس با عدد پیک محاسبه شده از رابطه (۱۹) مقایسه می‌شود.

جدول ۲- شرایط مرزی دما و جریان

جریان	دما	مرز
$u_x = U_\infty, u_y = 0$	$\vec{\omega} = 0$	$T = T_0$ $x = 0 \text{ m}$
$P_{Gage} = 0$	$\vec{\omega} = 0$	$\partial T / \partial x = 0$ $x = 0.06 \text{ m}$
$u_x = 0, u_y = 0$	$\vec{\omega} = 0$	$\partial T / \partial n = 0$ الکتروود تزریق کننده
$u_x = 0, u_y = 0$	$\vec{\omega} = 0$	$q'' = 1000$ $y = 0 \text{ m}$
$u_x = 0, u_y = 0$	$\vec{\omega} = 0$	$q'' = 0$ $y = 0.01 \text{ m}$

جدول ۳- شرایط مرزی پتانسیل و چگالی بار الکتریکی

چگالی بار الکتریکی	پتانسیل الکتریکی	مرز
$\partial \rho_c / \partial x = 0$	$\partial V / \partial x = 0$	$x = 0 \text{ m}$
$\partial \rho_c / \partial x = 0$	$\partial V / \partial x = 0$	$x = 0.06 \text{ m}$
قانون پیک	$V = V_0$	الکتروود تزریق کننده
$\partial \rho_c / \partial y = 0$	$V = 0$	$y = 0 \text{ m}$
$\partial \rho_c / \partial y = 0$	$\partial V / \partial y = 0$	$y = 0.01 \text{ m}$

این روند سعی و خطا تا برابر شدن میدان الکتریکی به دست آمده از حل عددی و مقدار حاصل از رابطه پیک ادامه می‌یابد [۱۹].

$$E_0 = 3.1 \times 10^6 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r}} \right) \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، شعاع الکتروود تزریق کننده بر حسب سانتیمتر می‌باشد.

۵- روش حل عددی

به منظور حل عددی معادلات حاکم، از کد متن‌باز اپن‌فوم^۱ استفاده شده است. معادلات حاکم در اپن‌فوم بر اساس روش حجم محدود گسسته‌سازی شده است [۱۸]. ابتدا معادلات میدان الکتریکی به روش صریح و پایا، حل می‌شوند. برای این منظور بعد از یافتن مقدار مناسب چگالی بار الکتریکی بر روی الکتروود تزریق کننده، حل تا همگرایی میدان‌های پتانسیل و چگالی بار الکتریکی ادامه می‌یابد. به منظور تشخیص همگرایی، معیار کاهش باقیمانده‌های تراز شده 10^{-6} می‌باشد. پس از همگرا شدن حل، نیروی کولمب جهت افزودن به معادله مومنتم محاسبه می‌شود. سپس معادلات جریان سیال در حالت پایا و توسط حل کننده بر پایه فشار به صورت ضمنی شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین برای تصحیح ارتباط میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل^۲ استفاده شده است. کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر هفت هسته‌ای ۲ گیگاهرتز اینتل انجام شده و زمان محاسباتی حدود ۲-۴ ساعت برای معادلات جریان الکتریکی و حدود ۲-۴ ساعت برای معادلات جریان سیال می‌باشد.

¹ OpenFoam4.0

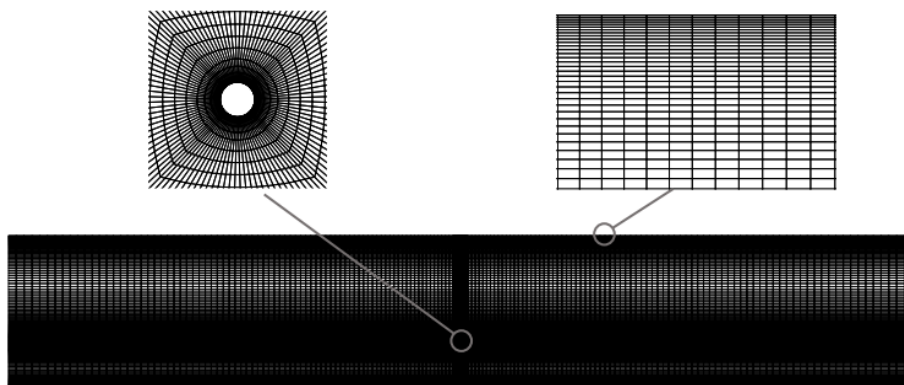
² SIMPLE

۶- شبکه محاسباتی و استقلال حل عددی از شبکه

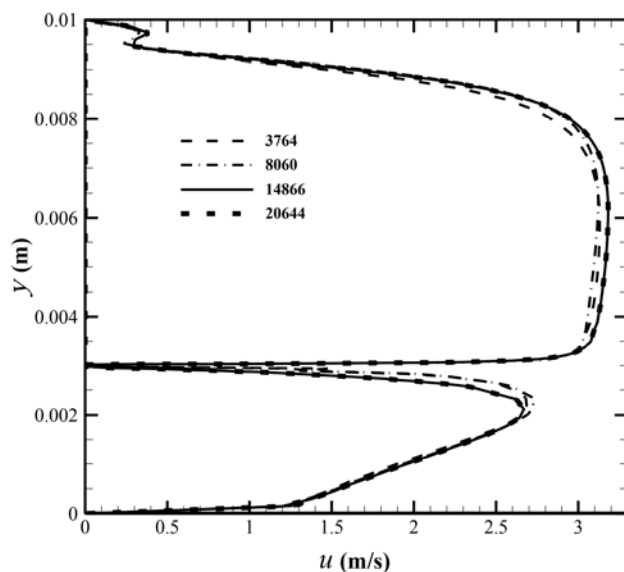
شبکه‌بندی دامنه محاسباتی توسط نرم افزار تجاری گمبیت ۲/۴ به صورت سازمان یافته و غیریکنواخت می‌باشد. به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان‌های نزدیک به دیواره‌ها و الکتروود تزریق کننده که گرادیان‌های شدید وجود دارد، از شبکه‌بندی با تراکم بیشتری استفاده شده است. در شکل (۲) نمایی از شبکه محاسباتی، شبکه‌بندی ایجاد شده در اطراف الکتروود تزریق کننده و نزدیک دیواره‌ها نشان داده شده است. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، توزیع سرعت در جهت جریان در $x = 0.03 \text{ m}$ در امتداد ارتفاع کانال به عنوان پارامتر استقلال از شبکه انتخاب شده است. همان گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، از چهار شبکه‌بندی مختلف در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و ولتاژ اعمالی (KV) ۱۰ استفاده شده است. با توجه به شکل (۳) واضح است که با تغییر تعداد شبکه از ۱۴۸۶۶ به ۲۰۶۴۴ تفاوت اندکی در جواب‌ها مشاهده می‌شود، بنابراین شبکه با تعداد ۱۴۸۶۶ به لحاظ داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به عنوان شبکه مناسب انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که استقلال از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۷- اعتبارسنجی نتایج

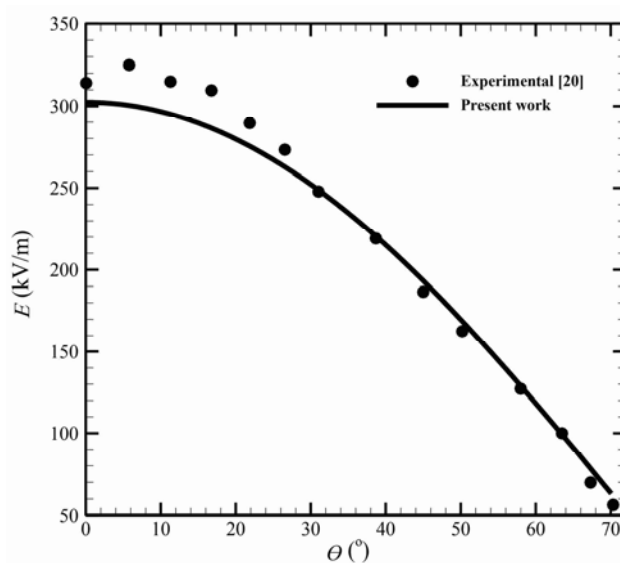
به منظور اعتبارسنجی نتایج میدان الکتریکی و تعیین دقیق نیروی کولمب، نتایج کار حاضر با نتایج تجربی اوسالا و زبوج [۲۰] مقایسه شده است. آن‌ها به صورت تجربی توزیع میدان الکتریکی روی یک صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند. همان گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود تطابق خوبی نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی برقرار است.



شکل ۲- نمایی از شبکه محاسباتی

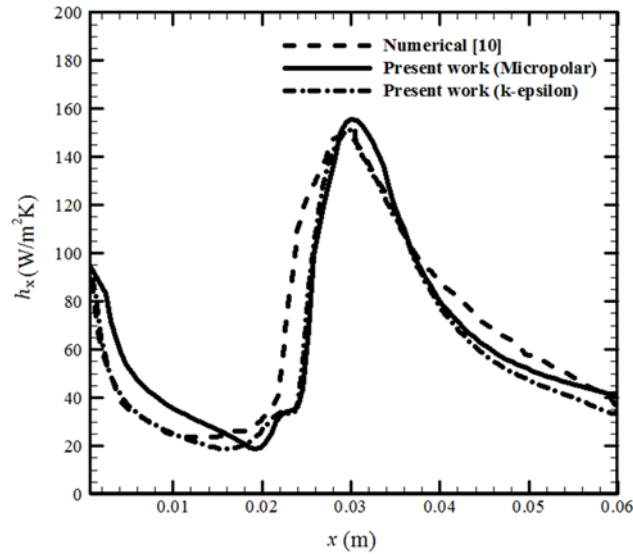


شکل ۳- توزیع سرعت در امتداد ارتفاع کانال برای شبکه‌های مختلف در $x = 0.03 \text{ m}$



شکل ۴- توزیع میدان الکتریکی بر روی صفحه جمع‌کننده، $V=18 \text{ kV}$

همچنین جهت بررسی صحت نتایج عددی، توزیع ضریب انتقال حرارت بر روی دیواره پایین با نتایج عددی پنگ و همکاران [۱۰] برای جریان هوا با عدد رینولدز ۱۰۰۰ و ولتاژ اعمالی ۱۰ (kV) در شکل (۵) مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج عددی مدل میکروپولار، مدل آشفستگی کی-اِپسیلون استاندارد و نتایج عددی پنگ و همکاران با دقت قابل قبولی مطابقت دارند.



شکل ۵- مقایسه ضریب انتقال حرارت موضعی در کار حاضر با نتایج پنگ و همکاران [۱۰]

۸- بحث و بررسی نتایج

در این تحقیق، تأثیر تعداد و موقعیت الکتروود تزریق کننده بر پارامتر مادی مدل میکروپولار به صورت عددی بررسی شده است. این پارامتر در مدل میکروپولار عددی ثابت نمی‌باشد و کاملاً به جریان و نیروهای حاصل از میدان الکتریکی وابسته است و باید در تحلیل عددی برای هر هندسه با شرایط مشخص تنظیم گردد [۱۳]. از سوی دیگر به منظور ارزیابی نتایج، نتایج حاصل از مدل میکروپولار با نتایج مدل آشفتگی کی-اپسیلون استاندارد مقایسه می‌شوند. محاسبات برای عدد رینولدز ۱۰۰۰ و ولتاژ اعمالی ۱۰ کیلوولت انجام شده است. همچنین برای مقایسه و ارزیابی نتایج بین دو مدل، نسبت ضریب انتقال حرارت محلی تحت تأثیر میدان الکتریکی به ضریب انتقال حرارت محلی بدون اعمال میدان الکتریکی ($h_{x-EHD}/h_{x-noEHD}$) که ضریب افزایش انتقال حرارت نامیده می‌شود، انتخاب می‌گردد.

ضریب انتقال حرارت موضعی روی دیواره پایین مطابق رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود [۱۰].

$$h_x = \frac{q''}{(T_{wall,x} - T_{bulk,x})} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)، q'' شار حرارتی ثابت منتقل شده از سطح دیواره پایین به کانال، $T_{wall,x}$ دمای موضعی دیواره پایین و $T_{bulk,x}$ دمای توده حجمی^۱ موضعی می‌باشد.

همچنین عدد رینولدز بر اساس طول مشخصه کانال مطابق رابطه (۲۱) تعریف شده است.

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} L_c}{\mu} \quad (21)$$

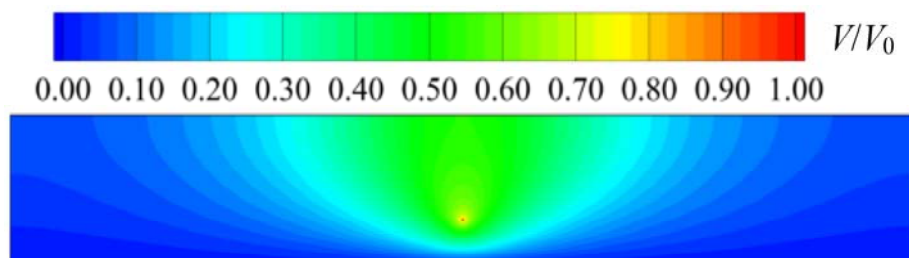
^۱ Bulk

۸-۱- نتایج تحلیل میدان الکتریکی

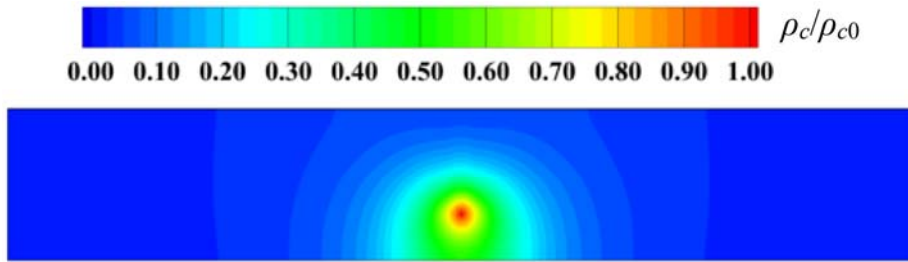
به منظور بررسی میدان الکتریکی حاصل از اعمال ولتاژ الکتریکی به الکتروود تزریق کننده، توزیع بی بعد پتانسیل و چگالی بار الکتریکی برای حالتی که الکتروود تزریق کننده در $d = 30(\text{mm})$ و $h = 3(\text{mm})$ قرار داشته باشد، به ترتیب در شکل (۶) و شکل (۷) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، پتانسیل الکتریکی در نزدیکی الکتروود تزریق کننده دارای مقدار بیشینه می باشد و با نزدیک شدن به سطح الکتروود جمع کننده از مقدار آن کاسته می شود. از طرف دیگر مقدار چگالی بار الکتریکی نیز بر روی الکتروود تزریق کننده مقدار بیشینه می باشد و با فاصله گرفتن از سطح الکتروود تزریق کننده، چگالی بار الکتریکی کاهش می یابد. بنابراین، نیروی کولمب حاصل از میدان الکتریکی در مجاورت الکتروود تزریق کننده بیشتر است و انتظار می رود جریان ثانویه تولیدی در اثر یونیزاسیون سیال دی الکتریک در زیر الکتروود تزریق کننده دارای قدرت بیشتری باشد. در نتیجه مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده می تواند بر ایجاد گردابه و پارامتر مادی مدل میکروپولار که کاملاً وابسته به نیروی اعمالی از میدان الکتریکی می باشد، نقش مهمی را ایفا نماید.

۸-۲- تأثیر پارامتر مادی بر میدان جریان هوا

نسبت ویسکوزیته میکرو چرخشی به لزجت دینامیکی (κ_{ω}/μ) که پارامتر مادی نامیده شده است، نقش مهمی در مدل میکروپولار ایفا می کند. این پارامتر کاملاً به جریان سیال و نیروهای حاصل از میدان الکتریکی وابسته می باشد. برای دستیابی به نتایج صحیح در هر مورد خاص با استفاده از مدل میکروپولار، مقادیر مختلفی از پارامتر مادی مورد بررسی قرار می گیرد. به منظور بررسی تأثیر پارامتر مادی، خطوط جریان و تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی روی دیوار پایینی به ازای مقادیر مختلف این پارامتر برای حالت تک الکتروود تزریق کننده در $d = 30(\text{mm})$ و $h = 3(\text{mm})$ به ترتیب در شکل (۸) و شکل (۹) نشان داده شده اند. برای هر نوع جریان الکتروهدرودینامیک با شرایط مشخص، پارامتر مادی دارای یک مقدار مناسب است که به ازای آن مقدار، نتایج مدل میکروپولار صحیح بوده و با نتایج مدل آشفتگی کی-اِپسیلون استاندارد مطابقت دارد. مقدار مناسب پارامتر مادی در هر مورد، با سعی و خطا بدست می آید.

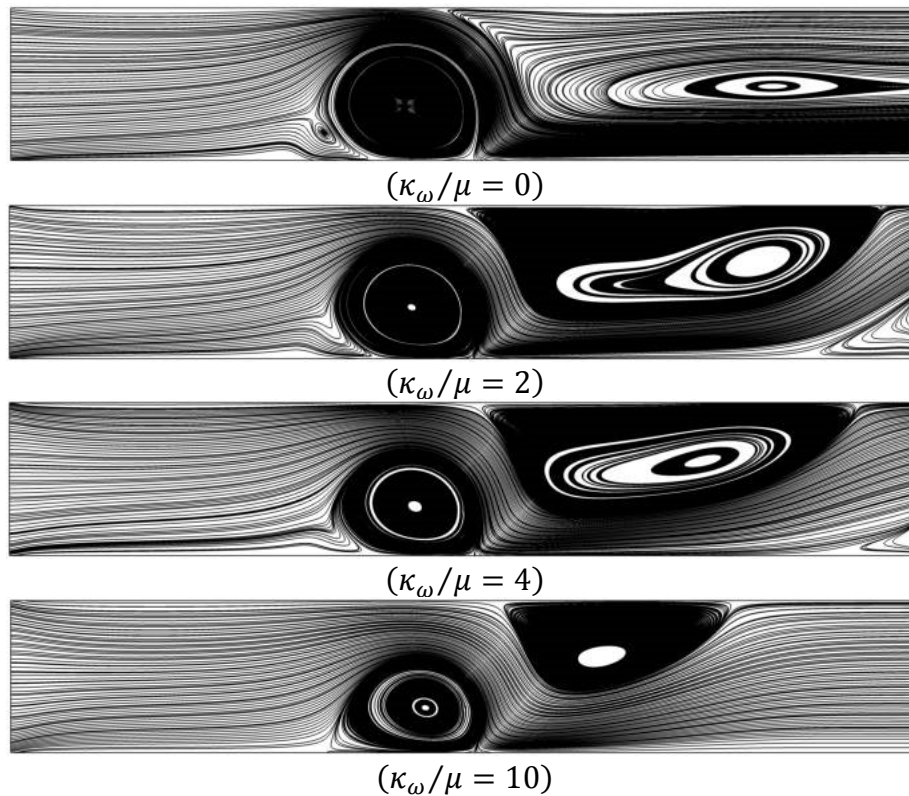


شکل ۶- توزیع بی بعد پتانسیل الکتریکی، $V=10 \text{ kV}$

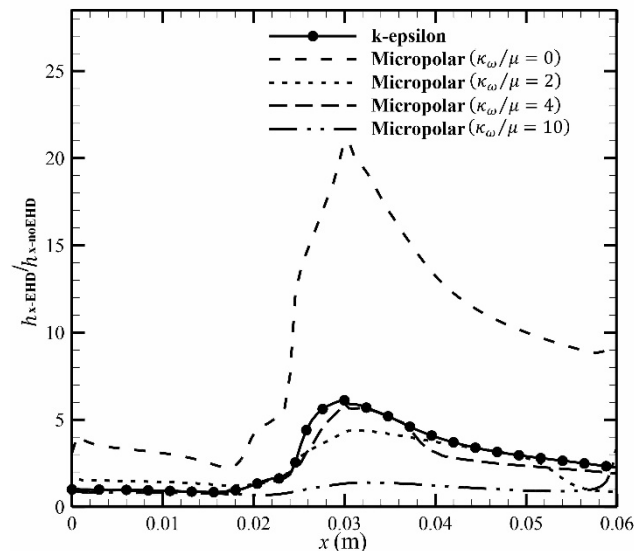


شکل ۷- توزیع بی بعد چگالی بار الکتریکی، $V=10$ kV

همان گونه که در شکل (۸) مشاهده می شود، به ازای مقادیر متفاوت پارامتر مادی، گردابه ها در این مدل دارای اندازه های مختلف می باشند، زیرا با افزایش این پارامتر، جریان تمایل بیشتری به چرخش خواهد داشت. همچنین، شکل (۹) نشان دهنده این مطلب است که افزایش انتقال حرارت در مدل میکروپولار به ازای مقدار مناسب پارامتر مادی $(\kappa_\omega/\mu) = 4$ ، دارای مقدار مشابهی با مدل آشفتگی کی-اِپسیلون استاندارد می باشد.



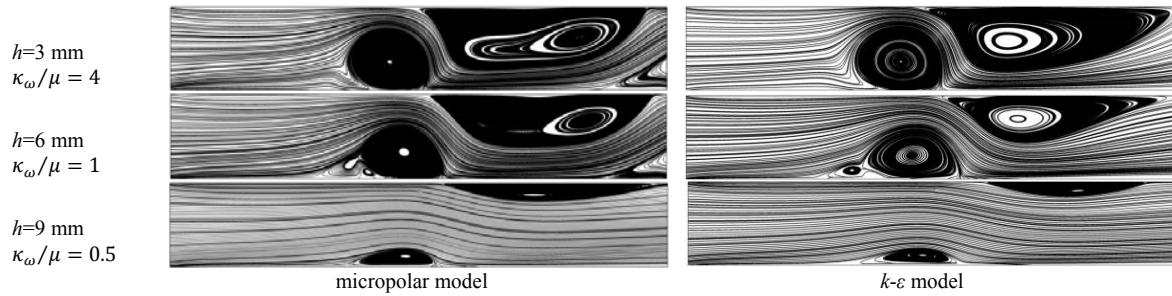
شکل ۸- خطوط جریان، $(d=30$ mm, $h=3$ mm)



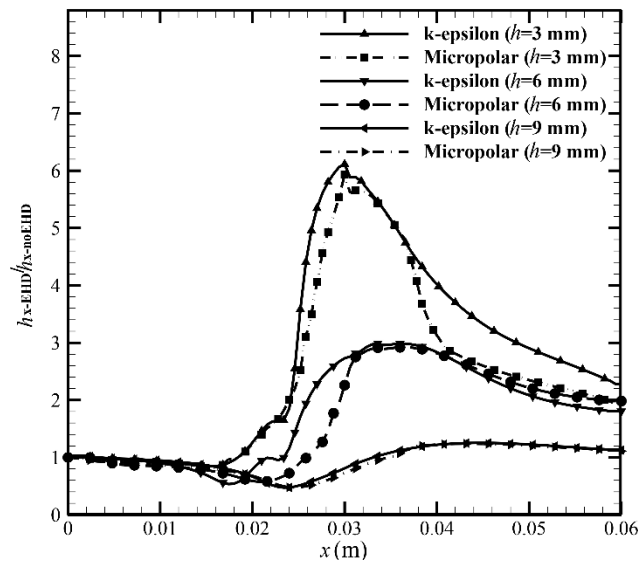
شکل ۹- ضریب افزایش انتقال حرارت روی دیواره پایین برای مدل آشفتگی کی-اپسیلون و مدل میکروپولار با مقادیر مختلف κ_{ω}/μ

۸-۳- تأثیر فاصله بین الکترود تزریق کننده و الکترود جمع کننده

خطوط جریان تحت تأثیر میدان الکتریکی در فاصله‌های مختلف بین الکترود تزریق کننده و جمع کننده برای مدل‌های میکروپولار و آشفتگی کی-اپسیلون در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، خطوط جریان به عنوان یک معیار کیفی ارزیابی، برای هر دو مدل تقریباً مشابه می‌باشد. با توجه به شکل (۱۰)، مشخص است که با کاهش اندازه فاصله بین الکترود تزریق کننده و الکترود جمع کننده، قدرت باد کرونا بیشتر شده و گردابه‌های قوی‌تر ایجاد می‌گردد. همچنین، گردابه‌های بالادست برای هر دو مدل الگو و اندازه یکسانی دارند، اما گردابه‌های پایین دست دارای اندازه‌های متفاوتی می‌باشند. این تفاوت می‌تواند به دلیل استفاده از مدل کاملاً آشفته برای جریان در محدوده رژیم آرام و یا انتخاب پارامتر مادی مدل میکروپولار باشد. به منظور ارزیابی دقیق‌تر بین دو مدل میکروپولار و آشفتگی کی-اپسیلون، ضریب افزایش انتقال حرارت ($h_{x-EHD}/h_{x-noEHD}$) روی دیواره پایین کانال برای فاصله‌های مختلف بین الکترود تزریق کننده و صفحه جمع کننده در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق نتایج حاضر، ضریب افزایش انتقال حرارت برای هر دو روش یکسان می‌باشد. با توجه به اینکه پارامتر مادی مدل میکروپولار وابسته به نیروی حاصل از میدان الکتریکی و رژیم جریان می‌باشد، با افزایش قدرت باد کرونا و ثابت ماندن عدد رینولدز جریان، مقدار این پارامتر با کاهش فاصله بین الکترود تزریق کننده و صفحه جمع کننده افزایش می‌یابد. مقدار پارامتر مادی که به ازای آن نتایج مدل میکروپولار با نتایج مدل آشفتگی کی-اپسیلون مطابقت دارد، به ترتیب برای فاصله بین الکترود تزریق کننده و الکترود جمع کننده ۹، ۶ و ۳ میلی‌متر، برابر با ۰/۵، ۱ و ۴ می‌باشد.



شکل ۱۰- خطوط جریان برای فواصل مختلف بین الکتروود تزریق کننده و الکتروود جمع کننده

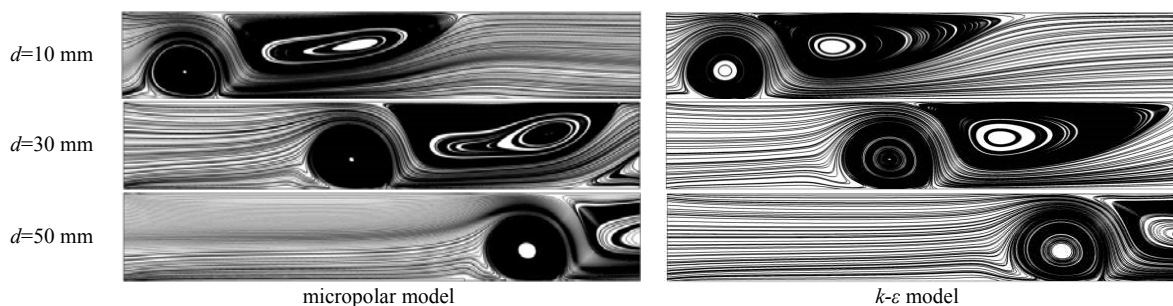


شکل ۱۱- ضریب افزایش انتقال حرارت روی دیواره پایین کانال برای فواصل مختلف بین الکتروود تزریق کننده و الکتروود جمع کننده

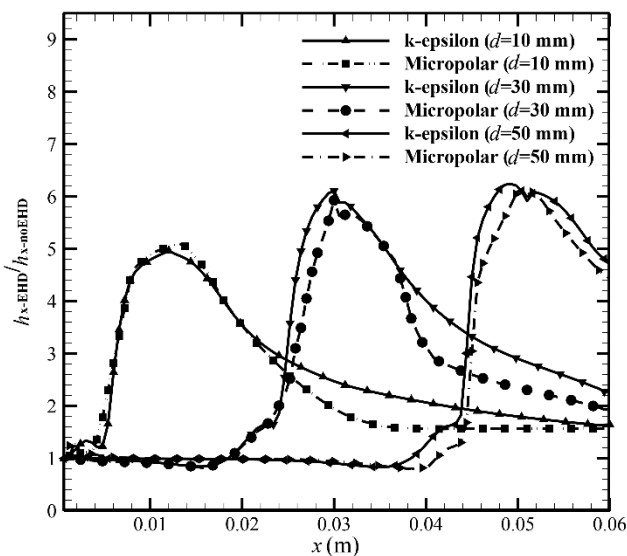
۸-۴- تأثیر موقعیت طولی الکتروود تزریق کننده

در این بخش، تأثیر موقعیت طولی الکتروود تزریق کننده بر مقدار پارامتر مادی مدل میکروپولار مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه این پارامتر کاملاً وابسته به جریان و نیروهای حاصل از میدان الکتریکی می‌باشد، با تغییر موقعیت طولی الکتروود تزریق کننده، عدد رینولدز جریان و نیروی کولمب تغییری نمی‌کنند. بنابراین دستاورد قابل توجهی حاصل می‌گردد به طوری که مقدار پارامتر مادی ثابت باقی می‌ماند.

شکل (۱۲) نشان‌دهنده خطوط جریان مشابه برای مدل آشفتگی کی-اِپسیلون با مدل میکروپولار با مقدار پارامتر مادی ثابت $(\kappa_\omega/\mu) = 4$ می‌باشد. لازم به ذکر است که با تغییر موقعیت طولی الکتروود تزریق کننده، جریان ثانویه باد کرنا تقریباً ثابت می‌ماند، بنابراین اندازه گردابه‌های اطراف الکتروود تزریق کننده در موقعیت‌های مختلف تقریباً یکسان می‌باشد. همچنین، به منظور بررسی دقت بین دو مدل، ضریب افزایش انتقال حرارت روی دیواره پایین کانال برای موقعیت‌های طولی مختلف الکتروود تزریق کننده در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین نتایج مدل آشفتگی کی-اِپسیلون و مدل میکروپولار برقرار می‌باشد.



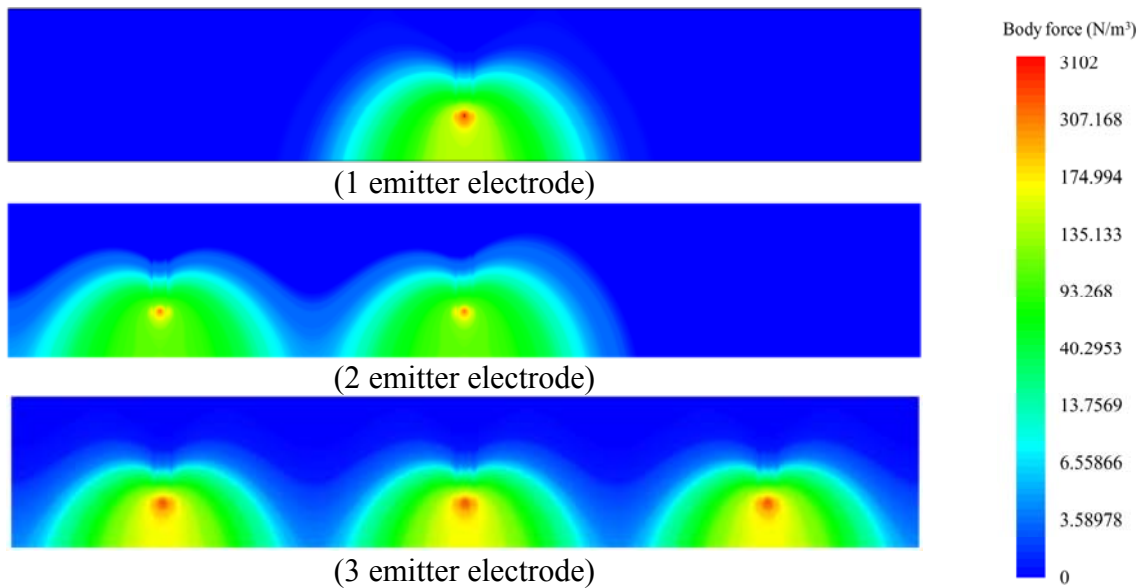
شکل ۱۲- خطوط جریان برای موقعیت‌های طولی مختلف الکتروود تزریق کننده



شکل ۱۳- ضریب افزایش انتقال حرارت روی دیواره پایین کانال برای موقعیت‌های طولی مختلف الکتروود تزریق کننده

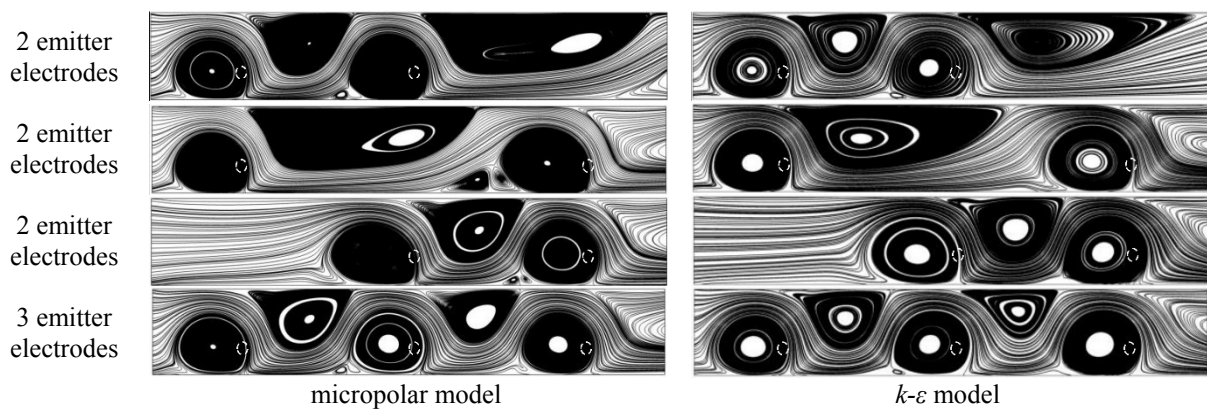
۸-۵- تأثیر آرایش طولی الکتروودهای تزریق کننده

تأثیر آرایش طولی مختلف چند الکتروود تزریق کننده بر مقدار پارامتر مادی مدل میکروپولار در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. توزیع نیروی حجمی میدان الکتریکی برای آرایش‌های مختلف الکتروودهای تزریق کننده در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۴)، نیروی حجمی میدان الکتریکی در نزدیکی الکتروودهای تزریق کننده دارای مقدار بیشینه می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، توزیع این نیرو در اطراف الکتروود تزریق کننده برای حالت تک الکتروود با الکتروودهای چندگانه، یکسان می‌باشد. بنابراین مقدار پارامتر مادی برای آرایش‌های طولی مختلف برای چند الکتروود تزریق کننده، ثابت می‌باشد، زیرا این پارامتر وابسته به نیروی حجمی حاصل از میدان الکتریکی است که مقدار بیشینه این نیرو برای آرایش‌های مختلف الکتروود تزریق کننده ثابت است.



شکل ۱۴- توزیع نیروی حجمی الکتریکی برای تعداد مختلف الکترود تزریق کننده، $V=10 \text{ kV}$

خطوط جریان برای آرایش‌های متفاوت الکترودهای تزریق کننده در شکل (۱۵) نشان داده شده است. خط-چین‌های دایروی سفید، موقعیت الکترود تزریق کننده در میدان جریان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۵)، الگوی جریان با تعداد الکترود تزریق کننده متغیر می‌باشد به نحوی که هر الکترود سبب ایجاد گرداب در اطرافش می‌گردد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، خطوط جریان حاصل از مدل آشفتگی کی-اپسیلون با مدل میکروپولار با مقدار پارامتر مادی ثابت $(\kappa_\omega/\mu) = 4$ مشابه می‌باشند. این نتایج نشان‌دهنده این است که پس از دستیابی به مقدار مناسب پارامتر مادی مدل میکروپولار در جریان‌های الکتروهایدرودینامیک با عدد رینولدز و ولتاژ اعمالی ثابت برای یک الکترود تزریق کننده، این مدل با همان مقدار پارامتر مادی می‌تواند برای پیکربندی‌های گوناگون با چندین الکترود تزریق کننده گسترش یابد.



شکل ۱۵- خطوط جریان برای موقعیت‌های طولی گوناگون الکترودهای تزریق کننده با تعداد مختلف

۹- نتیجه گیری

در این مطالعه، پدیده الکتروهایدرودینامیک در یک کانال مستطیلی در رژیم جریان آرام با استفاده از مدل میکروپولار به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر پارامترهایی همچون موقعیت طولی الکتروود تزریق کننده، فاصله بین الکتروود تزریق کننده و الکتروود جمع کننده و آرایش طولی چند الکتروود تزریق کننده بر روی مقدار پارامتر مادی بررسی شده است. علاوه بر این، نتایج مدل میکروپولار با نتایج مدل کاملاً آشفتگی-کی-اپسیلون، که معمولاً برای شبیه سازی پدیده الکتروهایدرودینامیک از آن استفاده می گردد، مقایسه شده است. مهم ترین نتایج به دست آمده به صورت زیر می باشد:

- برای هر نوع جریان الکتروهایدرودینامیک با شرایط مشخص، پارامتر مادی دارای یک مقدار مناسب می باشد که به ازای آن مقدار، نتایج مدل میکروپولار از نظر کمی و کیفی با نتایج مدل آشفتگی-کی-اپسیلون استاندارد مطابقت دارد.
- هنگامی که ولتاژ اعمالی و عدد رینولدز جریان ثابت هستند، مقدار پارامتر مادی با تغییر موقعیت طولی الکتروود تزریق کننده، ثابت باقی می ماند.
- با کاهش فاصله بین الکتروود تزریق کننده و الکتروود جمع کننده و افزایش قدرت باد کرونا، مقدار (κ_ω/μ) افزایش می یابد. مقدار پارامتر مادی به ترتیب برای فاصله بین الکتروود تزریق کننده و الکتروود جمع کننده ۹، ۶ و ۳ میلی متر، برابر با ۰/۵، ۱ و ۴ می باشد.
- مقدار پارامتر مادی برای آرایش های طولی مختلف برای چند الکتروود تزریق کننده، ثابت می باشد، زیرا این پارامتر وابسته به نیروی حجمی حاصل از میدان الکتریکی است که مقدار بیشینه این نیرو در یک ولتاژ اعمالی مشخص، برای آرایش های مختلف الکتروود تزریق کننده تقریباً ثابت است.
- بیشینه اختلاف بین نتایج حاصل از مدل میکروپولار به ازای پارامتر مادی مناسب، با نتایج بدست آمده از مدل آشفتگی-کی-اپسیلون برابر با ۱۴/۲ درصد است.

مراجع

- [1] Dolati, F., Amanifard, N., Daylami, H. M., and Yazdani, K., "Numerical Analysis of the Electric Field Effect on Mass Transfer Through a Moist Object", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 383-393, (2017).
- [2] Leonard, G., Mitchner, M., and Self, S., "An Experimental Study of the Electrohydrodynamic Flow in Electrostatic Precipitators", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 127, pp. 123-140, (1983).
- [3] Davidson, J. H., and Shaughnessy, E. J., "Turbulence Generation by Electric Body Forces", *Experiments in Fluids*, Vol. 4, No. 1, pp. 17-26, (1986).
- [4] Kallio, G., and Stock, D., "Interaction of Electrostatic and Fluid Dynamic Fields in Wire Plate Electrostatic Precipitators", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 240, pp. 133-166, (1992).

- [5] Soldati, A., and Banerjee, S., "Turbulence Modification by Large-scale Organized Electrohydrodynamic Flows", *Physics of Fluids*, Vol. 10, No. 7, pp. 1742-1756, (1998).
- [6] Ahmedou, S. O., and Havet, M., "Effect of Process Parameters on the EHD Airflow", *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No. 2-3, pp. 222-227, (2009).
- [7] Deylami, H. M., Amanifard, N., Dolati, F., Kouhikamali, R., and Mostajiri, K., "Numerical Investigation of using Various Electrode Arrangements for Amplifying the EHD Enhanced Heat Transfer in a Smooth Channel", *Journal of Electrostatics*, Vol. 71, No. 4, pp. 656-665, (2013).
- [8] Kasayapanand, N., and Kiatsiriroat, T., "Optimized Electrode Arrangement in Solar Air Heater", *Renewable Energy*, Vol. 31, No. 4, pp. 439-455, (2006).
- [9] Ayuttaya, S. S. N., Chaktranond, C., and Rattanadecho, P., "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*, Vol. 64, pp. 361-374, (2013).
- [10] Peng, M., Wang, T. H., and Wang, X. D., "Effect of Longitudinal Electrode Arrangement on EHD-Induced Heat Transfer Enhancement in a Rectangular Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 93, pp. 1072-1081, (2016).
- [11] Molki, M., and Damronglerd, P., "Electrohydrodynamic Enhancement of Heat Transfer for Developing Air Flow in Square Ducts", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 35-45, (2006).
- [12] Eringen, A. C., "Simple Microfluids", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 205-217, (1964).
- [13] Moayedi, H., Amanifard, N., Deylami, H. M., and Dolati, F., "Numerical Investigation of using Micropolar Fluid Model for EHD Flow Through a Smooth Channel", *Journal of Electrostatics*, Vol. 87, pp. 51-63, (2017).
- [14] Lukaszewicz, G., "*Micropolar Fluids: Theory and Applications*", Springer Science & Business Media, (1999).
- [15] Eringen, A., and Ryan, M., "Microcontinuum Field Theories II: Fluent Media", *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 55, pp. B15, (2002).
- [16] Swapna, G., Kumar, L., and Bhardwaj, N., "Study of Effects of Radiation and Magnetic Field on the Mixed Convection Micropolar Fluid Flow Towards a Stagnation Point on a Heated Vertical Permeable Plate using Finite Element Method", *International Journal of MechanicSystems Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-13, (2015).
- [17] Sandeep, N., and Sulochana, C., "Dual Solutions for Unsteady Mixed Convection Flow of MHD Micropolar Fluid Over a Stretching/Shrinking Sheet with Non-uniform Heat Source/Sink", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, No. 4, pp. 738-745, (2015).

- [18] Direct, C., "The Architects of OpenFOAM", OpenFOAM User Guide, (2015).
- [19] Heidarinejad, G., and Babaei, R., "Numerical Investigation of the Electric Field Effect on the Flow Field and Enhancement of the Water Evaporation Rate", Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 101-110, (2015).
- [20] Oussalah, N., and Zebboudj, Y., "Finite-element Analysis of Positive and Negative Corona Discharge in Wire-to-plane System", The European Physical Journal Applied Physics, Vol. 34, No. 3, pp. 215-223, (2006).

فهرست نمادهای انگلیسی

گرمای ویژه (J/kg K)	C_p
ثابت‌های مدل کی-اوسیلون	$C_\mu, C_{2\varepsilon}, C_{1\varepsilon}$
ضریب پخش (m^2/s)	D_e
شدت میدان الکتریکی (V/m)	E
مقدار پیک (V/m)	E_0
نیروی حجمی الکتروهیدرودینامیک (N/m^3)	F_e
فاصله بین الکتروود و صفحه جمع‌کننده (m)	h
ارتفاع کانال (m)	H
چگالی میکرواینرسی (m^2)	j
چگالی جریان الکتریکی (A/m)	J
انرژی جنبشی آشفتگی (J)	k
لزجت میکرو چرخشی ($kg/m\ s$)	κ_ω
ضریب هدایت حرارتی (W/m K)	K
فاصله بین دو الکتروود تزریق‌کننده (m)	l
طول کانال (m)	L
طول مشخصه (m)	L_c
راستای عمود بر سطح	n
فشار (Pa)	P
عدد پرانتل	Pr
عدد پرانتل آشفتگی	Pr_t
شار حرارتی (W/m^2)	q''
شعاع الکتروود تزریق‌کننده (m)	r
عدد رینولدز	Re
زمان (s)	t

دما (K)	T
مؤلفه سرعت (m/s)	u
پتانسیل الکتریکی (V)	V
مختصات	x, y

نمادهای یونانی

یون پذیر (m ² /V s)	β
نرخ پراکندگی انرژی جنبشی (W)	ε
ضریب گذردهی الکتریکی (F/m)	ε_s
جایگشت	ε_{ijk}
لزجت گرادیان چرخشی (kg m/s)	γ
لزجت دینامیکی (kg/m s)	μ
چگالی سیال (kg/m ³)	ρ
چگالی بار الکتریکی (C/m ³)	ρ_c
ثابت مدل کی-اپسیلون	$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$
مؤلفه سرعت زاویه‌ای (1/s)	ω

زیرنویس

الکتریکی	e
1,2,3 اشاره به x, y, z	i, j, k
ورودی	in

Abstract

In this work, the effect of emitter electrode arrangement on the Electrohydrodynamic effectiveness is studied using micropolar fluid model through a smooth channel. The effects of longitudinal position and the gap between emitter electrode and collector electrode, as well as, longitudinal arrangements are investigated. The computed results of micropolar approach are compared with obtained from the fully turbulent $k-\varepsilon$ model. The results of each type of the EHD flow with certain conditions show that the adequate material parameter (κ_ω/μ) is constant for the longitudinal electrode arrangements. Also, this parameter is increased with decrease of the gap between emitter electrode and collector electrode.