نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۳، جلد ۱۹، پاییز ۱۳۸۷، صفحه ۶۰-۵۱
ویژه‌نامه مهندسی مکانیک

اثر پدیده EHD بر کنترل لایه مرزی ورقه‌ای روی استوانه به کمک دو الکترود سیمی و دو الکترود نواری چسبیده به سطح استوانه

غلامرضا تطهیری و اسماعیل اسماعیل زاده

چکیده: از جمله راه‌های کنترل نیروی درگ وارد بر استوانه، کنترل لایه مرزی تشکیل شده روی استوانه می باشد. یکی از روش‌های موثّر و نوین در کنترل لایه مرزی ورقه ای، استفاده از میدان‌های الکتریکی با ولتاژ بالا در جریان سیّال است. در چنین شرایطی به علت بررسی توأم معادلات میدان-های الکتریکی و معادلات اساسی مومنتم، مسأله تحت عنوان الکتروهیدرودینامیک EHD بحث می-شود. برای بررسی این موضوع، معادلات پیوستگی و مومنتم برای میدان سیّال و معادلات پایستاری جریان الکتریکی و پواسون برای الکتریسیته به صورت عددی و به روش حجم محدود حل شده‌اند. در این پژوهش از دو الکترود سیمی و دو الکترود صفحه‌ای برای اعمال میدان الکتریکی استفاده شده است. با استفاده از نتایج حاصله مشاهده شد که، نحوه تأثیرگذاری میدان‌های الکتریکی بر میدان جریان سیّال به شدّت تابع هندسه الکترودها و شدّت میدان الکتریکی است. با اعمال این نیروها، مومنتم ذرّات و بنابراین سرعت آنها در لایه مرزی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز این تأثیرات کاهش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: نیروی درگ، باد کرونا، لایه مرزی ورقه‌ای، جریان آرام، الکتروهیدرودینامیک

۱. مقدمه

با توجّه به کاربرد وسیع جریان حول استوانه، مسأله مطالعه پدیده‌های انتقال مومنتوم و گرما به صورت مجزّا و توأم، از گذشته مورد توجه پژوهشگران بوده است.

در برخی از کاربردها با به تأخیر انداختن جدایش لایه مرزی به کاهش نیروی پسا توجه می‌شود و درکاربردهای دیگر، به جدایش زودتر لایه مرزی به منظور ایجاد اغتشاش اضافی و پرتاب گردابه ها در منطقه دنباله و افزایش آهنگ انتقال حرارت سطوح در کنار این موانع توجه می شود. روش های کنترل جریان را می توان به سه دسته کلّی تقسیم کرد [۱] و [۲]:

۱- روش های غیر فعّال (passive)

۲- روش های فعّال (active)

۳- روش های ترکیبی (compound)

روش های غیر فعّال از سطحی با شکل خاص و یا افزودن مواد ویژه ای به سیّال اصلی استفاده می‌کنند، و نیاز به اعمال انرژی بیرونی در حین کنترل جریان ندارند. در حالی که روش های فعّال نیاز به تحریک بیرونی دارند. روش‌های ترکیبی نیز از هردو روش برای این منظور بهره می‌برند. تکنیک‌های افزایش انتقال گرما و جرم با استفاده از میدان‌های الکتریکی با ولتاژ بالا، که اساس آنها نیروهای الکتریکی به وجود آمده در اثر یونیزاسیون سیّال دی الکتریک می‌باشد، می‌توانند یکی از مطمئن ترین روش ها برای این منظور در نظر گرفته شوند.

در این روش بین الکترودهایی که در میدان مستقر شده اند ولتاژ بالایی تا نزدیکی های جرقّه یا شکست عایق، به منظور یونیزه کردن موضعی قسمتی از سیّال و ایجاد جریان ثانوی و افزایش شار مومنتوم در لایه مرزی، برقرار می شود. تداخل میدان الکتریکی و میدان جریان سیّال، الکتروهیدرودینامیک یا همان EHD نامیده می‌شود.

این مقاله در تاریخ ۸۵/۱۲/۲۷ دریافت و در تاریخ ۸۶/۸/۲۳ به تصویب نهایی رسیده است.

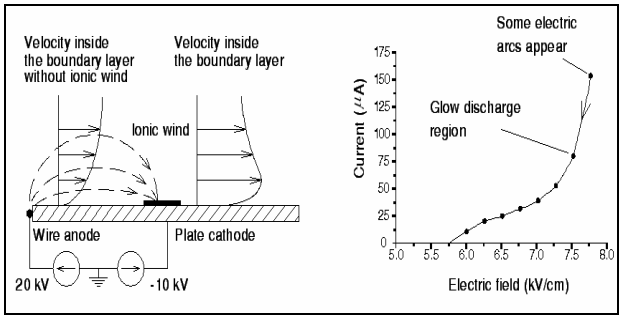
دکتر غلامرضا تطهیری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، gh_tathiri@yahoo.com
اسماعیل اسماعیل زاده، دانشکده *مکانیک*، دانشگاه *تبریز*، تبریز، آبرسان، دانشگاه تبریز esmzadeh@tabrizu.ac.ir

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

مزایای اصلی این محرّک ها عبارتند از[۳]:
۱) عدم وجود قطعات مکانیکی متحرّک و کاربرد ساده آنها
۲) کنترل سریع و تند جریان با اعمال میدان های الکتریکی مختلف. (تأخیر از مرتبه نانو ثانیه می‌باشد)
۳) خنک‌کاری موضعی گذرهای خمیده و پیچیده.
۴) مناسب برای محیط‌های ویژه و خاص همانند سفینه‌ها.
۵) جایگزین‌های CFC.
۶) مصرف الکتریسیته بسیارکم.
۷) کنترل انتقال حرارت و افزایش بازدهی تأسیسات حرارتی.
۸) قابلیّت به کارگیری در جریان های تک فازه و چندفازه.

۲. الکتروهیدرودینامیک

برای جریان گاز، یونیزاسیون به آسانی توسط اعمال یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا بین سیم یا الکترود سوزنی و الکترود صفحه ای به وجود می‌آید. این یون ها که توسط نیروی کولمب رانده می‌شوند، اندازه حرکتی به مولکول های خنثی اعمال می‌کنند و در نتیجه یک جریان حجمی از هوا به وجود می‌آید. این پدیده (باد یونی یا باد کرونا) می‌تواند برای افزایش مومنتم به کار رود.



شکل ۱. مکانیزم ایجاد باد یونی در اثر تخلیه الکتریکی، [۴]

۳. نیروهای الکتریکی وارده بر سیّال [۵]

مکانیزمهای الکتروهیدرودینامیک می‌توانند حرکت هایی برای افزایش آهنگ انتقال جرم در سیستم های تک فازه یا دو فازه به وجود آورند. نیروهای موثّر شناخته شده در این مکانیزمها عبارتند از: نیروی کولمب، نیروی دی الکتروفوریتیک و نیروی الکترواستریکشن [۶].

نیروی کولمب

این نیرو تنها نیرویی است که نیازمند حضور بارهای آزاد است. بارهای آزاد به یکی از دو روش متفاوت زیر در محیط سیّال برقرار می‌شوند:

اوّلین روش تزریق مستقیم بارهای آزاد توسط منبع کروناست. دوّمین روش القا بار بر اساس برقرار نمودن گرادیان هدایت الکتریکی عمود به جهت حرکت سیّال می‌باشد.

آشکارترین راه به وجود آوردن گرادیان هدایت الکتریکی در نظر گرفتن سطح مشترک دو فاز یا دو سیّال می‌باشد. روش دیگر برقراری گرادیان براساس این واقعیّت است که در سیّالات دی الکتریک، هدایت الکتریکی غالباً یک تابع قوی از دما می‌باشد. بنابراین اگر یک گرادیان دما وجود داشته باشد به دنبال آن گرادیان هدایت الکتریکی وجود خواهد داشت [۶].

نیروی دی الکتروفوریتیک

این نیرو براساس غیریکنواخت بودن ثابت دی‌الکتریک ماده در سطح مشترک حباب بخار با مایع به وجود می‌آید [۶].

نیروی الکترواستریکشن

این نیرو براساس تغییرات ثابت دی الکتریک با چگالی به وجود می‌آید. براساس این تعریف این نیرو فقط در سیّالات تراکم پذیر وجود خواهد داشت [۶].

الکتروهیدرودینامیک با برهم کنش یک میدان الکتریکی و جریان سیّال سروکار دارد. برای فهم و تحلیل این برهم کنش، باید نحوه توزیع میدان الکتریکی در سیّال مشخص باشد. میدان الکتریکی در حالت کلی توسط معادلات ماکسول تعیین می گردد. از قانون گاوس نتیجه می شود:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{D}=\rho_e \qquad (۱)$$

که در آن بردار جابجایی الکتریکی (D) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{D}=\varepsilon_0\vec{E}+\vec{P} \qquad (۲)$$

و بردار میدان الکتریکی (E) و بردار قطبش(P) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\vec{E}=-\vec{\nabla}V \qquad (۳)$$

$$\vec{P}=\varepsilon_0(k-1)\vec{E} \qquad (۴)$$

چگالی بار الکتریکی ρ_e را می‌توان از پایستگی بار الکتریکی محاسبه کرد:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{J}+\frac{\partial\rho_e}{\partial t}=0 \qquad (۵)$$

دو حالت ساده برای نحوه پخش چگالی بار الکتریکی، رسانایی تک قطبی و رسانایی اهمی می‌باشند. همان‌گونه که ملچر (Melcher)

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

و تیلور(Taylor) [۷] اعلام کرده‌اند بسیاری از پدیده های EHD را با استفاده از رسانایی اهمی می‌توان به درستی مدل کرد. در این روش چگالی کلی جریان J به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} + \rho_e\vec{u} + \rho_e\mu_e\vec{E} \qquad (۶)$$

که در آن جمله های طرف راست تساوی به ترتیب رسانایی، جابجایی و تحرّک پذیری یونی را بیان می‌کنند. جمله رسانایی، مکانیزمی را برای جریان الکتریکی نشان می‌دهد که در آن حامل‌های بار توسّط الکترودها به درون سیّال تزریق نشده اند بلکه به وسیله تجزیه مولکول‌ها در داخل سیّال، ذرّات باردار ایجاد شده‌اند.

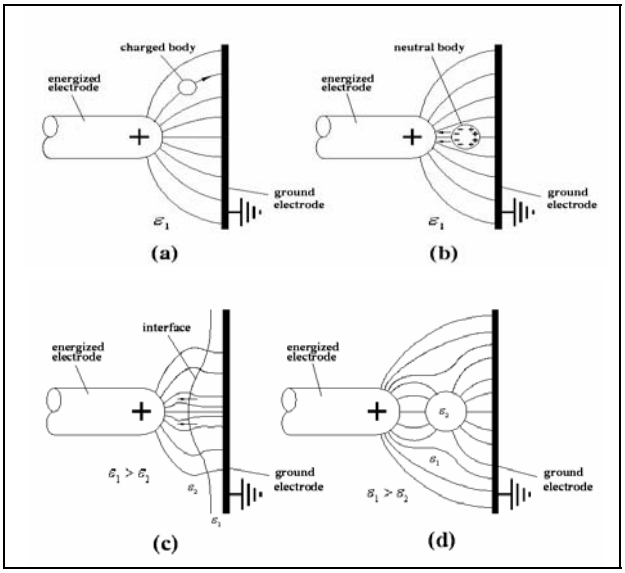
این فرایند همیشه بارهای مثبت و منفی را به تعداد مساوی تولید می‌کند، اگرچه توزیع نامتوازن بارهای مثبت و منفی نواحی باردار موضعی را ایجاد می‌کند، کل سیّال تحت اثر میدان الکتریکی به طور کلی از نظر الکتریکی خنثی می‌باشد. جمله جابجایی و تحرّک پذیری یونی با هم حرکت بار خالص الکتریکی را در داخل سیّال، با سرعت u در میدان الکتریکی E بیان می‌کنند. نیروی الکتریکی وارده بر مولکول ها در حضور میدان های الکتریکی شامل سه جز است:

$$\vec{f}_e = \rho_e\vec{E} - \frac{1}{2}E^2\nabla\varepsilon + \frac{1}{2}\nabla\left[E^2\rho\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)\right] \qquad (۷)$$

معادله (۷) توسط ملچر (Melcher) [۸]، با روش ترمودینامیکی و با فرض اینکه قطبش، تابعی خطّی از میدان الکتریکی اعمال شده است و فقط به چگالی سیّال بستگی دارد؛ به دست آمده است. سه جز معادله (۷) سه نوع مختلف از نیروهای موثّر بر ذرّات سیّال را بیان می‌کند.

جز اوّل، نیروهای موثّر بر بارهای آزاد را در حضور میدان الکتریکی نشان می‌دهد و تحت عنوان نیروهای کولمب شناخته شده اند. جمله‌های دوّم و سوّم نیروی قطبش اعمال شده بر سیّال را بیان می‌کنند.

شکل ۲ چهار نوع از نیروهای وارده بر سیّال دی الکتریک را که ناشی از اعمال میدان الکتریکی نا همگن می‌باشند، نشان می‌دهد[۹]. تصویر a نشان دهنده حرکت ذرّات باردار سیّال، ناشی از نیروی کولمب است. تصویر b حرکت انتقالی را که معمولاً دی الکتروفورسیس یا دی الکتروفورتیک نامیده می‌شود، نشان می‌دهد. این حرکت ناشی از تولید نیروهای قطبش در میدان الکتریکی ناهمگن می‌باشد، برای اینکه نیروی قطبش خالص در ناحیه‌ای از سیّال ایجاد شود نیاز به جابه جایی نسبی بارهای مثبت و منفی داخل ذرّات خنثی با اعمال میدان الکتریکی می‌باشد. به دوقطبی‌های ایجادشده توسّط این جابه جایی بارهای الکتریکی، یک نیروی خالص یک جهته در میدان الکتریکی ناهمگن وارد می‌شود.



شکل ۲. چهار نوع نیروی الکتریکی وارد بر ذرّات در میدان الکتریکی[۹]

۴. گسسته سازی معادلات الکتریکی به روش حجم محدود

برای کاربرد روش عددی حجم محدود برای مسائل الکتریکی از شباهت بین معادلات بیانگر جریان سیّال و معادلات بیانگر میدان الکتریکی استفاده شده است . با در نظر گرفتن یک جریان پایای سیّال تراکم ناپذیرکه معادله پیوستگی را ارضا می کند معادله پایستاری مومنتم و انرژی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\rho_f\vec{u}.\vec{\nabla}(\varphi) + \vec{V}.(\Gamma\vec{\nabla}\varphi) = S \qquad (۸)$$

که ρ_f چگالی سیال و u سرعت سیّال است وΓ ثابت پخش است. سه عبارت اصلی در معادله دیفرانسیل عمومی عبارتند از عبارت جابجایی، نفوذ و عبارت چشمه S. در مقایسه با معادله (۸) معادله پواسون و بقای جریان الکتریکی را به صورت زیر می نویسیم:

$$\nabla.(\varepsilon_0\nabla V) = -\rho \qquad (۹)$$

$$\varepsilon_0\vec{E}.\nabla\rho = -\rho^2 \qquad (۱۰)$$

معادله پواسون برای پتانسیل الکتریکی یک عبارت نفوذ و یک عبارت چشمه دارد. معادله پیوستگی جریان یک عبارت جابجایی و یک عبارت چشمه دارد. بنابراین ما می توانیم روش عمومی حجم محدود را که به صورت گسترده در دینامیک سیّالات محاسباتی کاربرد دارد، برای محاسبه توزیع پتانسیل الکتریکی و بار فضایی به کار ببریم.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

با استفاده از روش استاندارد برای اعمال عبارات نفوذ و عبارات چشمه، مشتق در معادله پواسون می تواند با استفاده از پروفیل های خطی و با انتگرال گیری بر روی حجم کنترل به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{V_E - V_P}{\Delta x(\delta x)_e} - \frac{V_p - V_W}{\Delta x(\delta x)_w} + \frac{V_N - V_P}{\Delta y(\delta y)_n} - \frac{V_P - V_S}{\Delta y(\delta y)_s} = -\rho_P / \varepsilon_0 \qquad (۱۱)$$

که ρ_P میانگین بار فضایی حجم کنترل P است. حال معادله گسسته شده را می توان به شکل زیر نوشت :

$$a_P V_P = a_E V_E + a_W V_W + a_N V_N + a_S V_S + b \qquad (۱۲)$$
$$a_E = 1/\Delta x(\delta x)_e$$
$$a_W = 1/\Delta x(\delta x)_w$$
$$a_N = 1/\Delta y(\delta y)_n$$
$$a_S = 1/\Delta y(\delta y)_s$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S, b = \rho_{eP}/\varepsilon_0 \qquad (۱۳)$$

معادله پایستگی جریان الکتریکی هیچ عبارت نفوذی ندارد، بنابراین معادله پایستگی جریان الکتریکی بیضوی است. به عبارت دیگر حرکت بارها با حرکت بارهای مثبت از بالا دست به پایین دست و حرکت بارهای منفی از پایین دست به بالا دست هم جهت است. در اینجا طرف بالادست و طرف پایین دست به جهت میدان الکتریکی بستگی دارد. انتگرال گیری از معادله (۱۰) بر حجم کنترل نتیجه زیر را می‌دهد:

$$(E_x)_e A_e \rho_e - (E_x)_w A_w \rho_w + (E_y)_n A_n \rho_n - (E_y)_s A_s \rho_s = -\rho_p^2 \Delta \upsilon / \varepsilon_0 \qquad (۱۴)$$

که Δv مساحت حجم کنترل P است.

چگالی بار فضایی در هر نقطه شبکه با جهت میدان الکتریکی و علامت بار فضایی تخمین زده می شود.

برای باد کرونای مثبت جهت شدّت میدان الکتریکی و حرکت یون مثبت یکسان است بنابراین باید از روش پیشرو استفاده کرد تا مطمئن شویم چگالی بار در مرز برابر با مقدار آن در گره بالادست است. یعنی:

$$\rho_e = \begin{cases} \rho_p \rightarrow if\ (E_X)_e > 0 \\ \rho_E \rightarrow if\ (E_X)_e < 0 \end{cases}$$

مقادیر ρ_w, ρ_n, ρ_s بصورت مشابه تعریف می‌شوند. بنابراین معادله (۱۴) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$a_P \rho_P = a_E \rho_E + a_W \rho_W + a_N \rho_N + a_S \rho_S + b \qquad (۱۵)$$

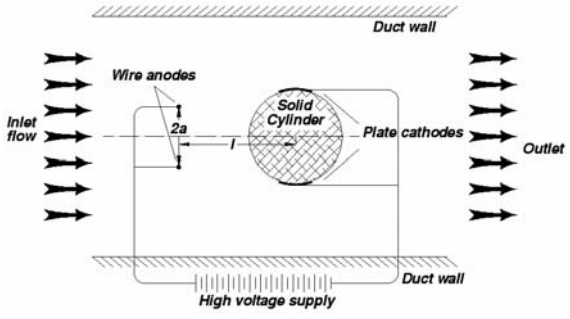
که در آن:

$$a_E = \max[-(E_x)_e A_e, 0]$$
$$a_W = \max[(E_x)_w A_w, 0]$$
$$a_N = \max[-(E_y)_n A_n, 0]$$
$$a_S = \max[(E_y)_s A_s, 0]$$
$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_s + [(E_x)_e A_e - (E_x)_w A_w + (E_y)_n A_n - (E_y)_s A_s]$$
$$b = -\rho_p^2 \Delta V / \varepsilon_0 \qquad (۱۶)$$

همچنین برای باد کرونای منفی جهت شدّت میدان الکتریکی مخالف جهت حرکت بار الکتریکی منفی است بنابراین باید از روش پسرو استفاده کرد تا مطمئن شویم چگالی بار در مرز برابر با مقدار آن در گره پایین دست است.

۵. نتایج

شکل ۳ هندسه مسأله مورد مطالعه را نشان می دهد. با توجّه به فواصل عایقی الکتریکی، مسأله برای نسبت L/r= ۵ و در دو حالت a/r= ۰/۶۷ و a/r= ۱/۶۷ حل شده است. ولتاژ اعمالی به الکترودها با توجّه به محدودیّت فواصل عایقی به ترتیب ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ولت در نظر گرفته شده است تا از این طریق نیز بتوان تأثیر افزایش اختلاف ولتاژ اعمالی را بر جریان مشاهده کرد.

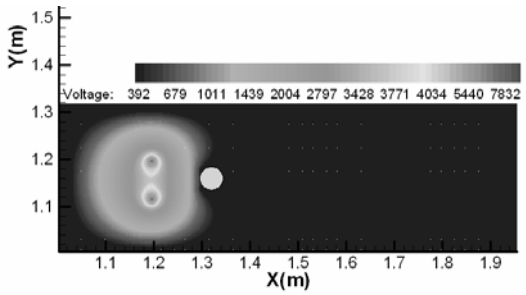


شکل ۳. نمای شماتیک مسأله

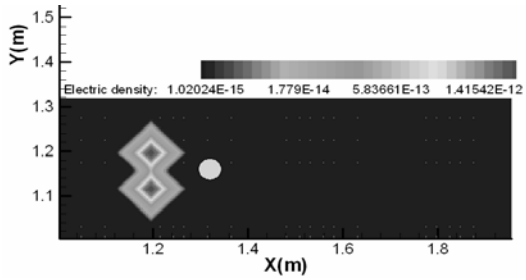
به دلیل وجود دو الکترود، ابتدا میدان ولتاژ و چگالی بارالکتریکی ناشی از هریک از الکترودهای سیمی، با حل معادله پواسون و بقای جریان الکتریکی، به طور جداگانه محاسبه شده و سپس با استفاده از اصل بر هم نهی، میدان ولتاژ و چگالی بار ناشی از دو الکترود به

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

دست می‌آید. همچنین می‌توان با استفاده از گرادیان میدان ولتاژ محاسبه شده مقادیر شدّت میدان الکتریکی را محاسبه کرد. اشکال ۴ و ۵ نمونه‌ای از حلّ میدان ولتاژ الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی حاصل از دو الکترود با ولتاژ اعمالی ۱۵ کیلو ولت، که به روش بر هم نهی به دست آمده است، را در L/r= ۵ و a/r= ۱/۶۷ نشان می‌دهند.



شکل ۴. بر هم نهی میدان های ولتاژ ناشی از الکترودها



شکل ۵. بر هم نهی میدان‌های چگالی بار ناشی از الکترودها

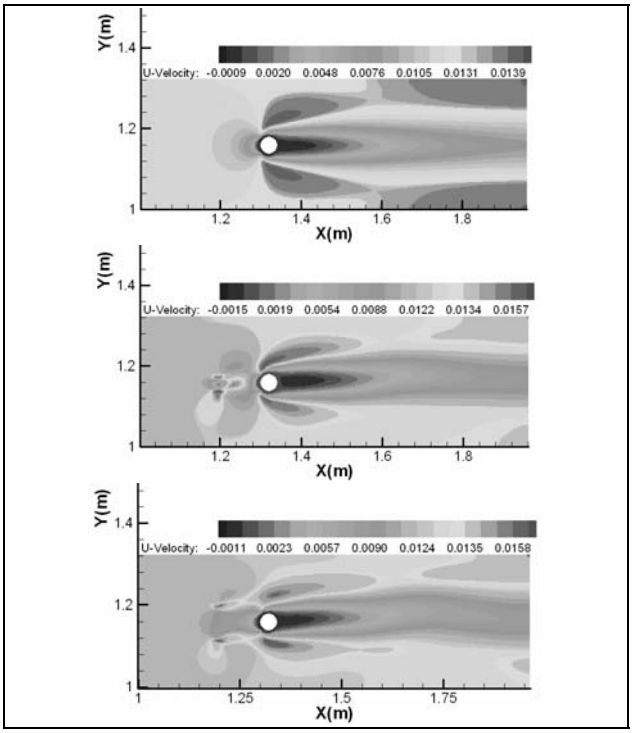
نتایج بدست آمده از حل میدان ولتاژ و چگالی بار الکتریکی را می‌توان بصورت نیروی حجمی در معادلات مربوط به چشمه سرعتهای افقی و عمودی وارد کرد.

$$Su(i,j) = Su(i,j) - EXW(i,j) \times Ro(i,j) \qquad (۱۷)$$

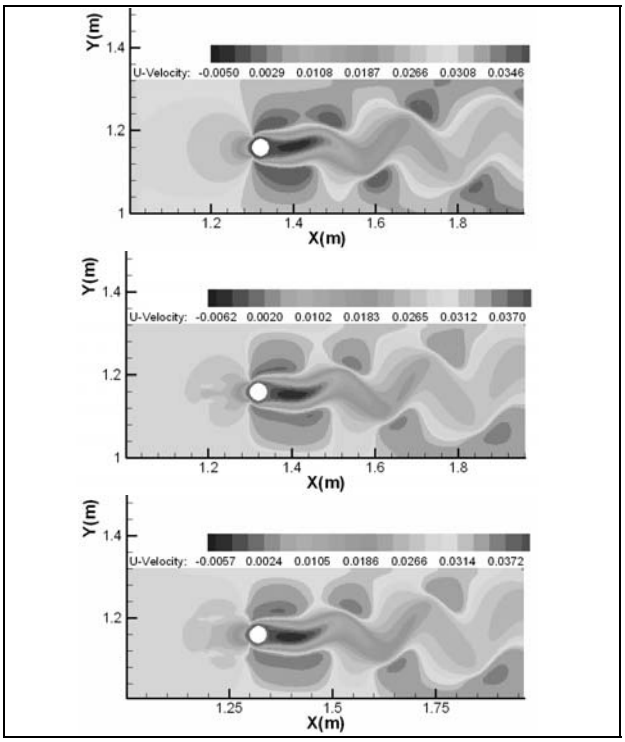
$$Su(i,j) = Su(i,j) - EYS(i,j) \times Ro(i,j) \qquad (۱۸)$$

نمونه‌ای از اعمال این نیرو با ولتاژ اعمالی ۱۵ کیلو ولت در اعداد رینولدز ۴۰ و ۱۰۰ در اشکال ۶ و ۷ آورده شده است. حالت اول بدون اعمال میدان الکتریکی، حالت دوم در حالت قرارگیری نزدیک الکترودها و حالت سوم قرارگیری دور الکترودها می‌باشد. در این کانتورها نحوه تأثیرگذاری میدان های الکتریکی بر میدان جریان سیّال به خوبی مشخص شده است.

اعمال میدان الکتریکی در عدد رینولدز ۴۰ باعث افزایش سرعت در محل برخورد جریان به استوانه به میزان تقریبی ۱۷ درصد می شود. همچنین اعمال میدان الکتریکی، به خصوص با ولتاژهای بالا باعث ناپایداری جریان بعد از عبور از استوانه می‌شود. در عدد رینولدز ۱۰۰ اعمال میدان‌های الکتریکی، افزایش کمی را در میزان سرعت، حدوداً ۲ درصد، سبب می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گیری کرد که برای تأثیر میدان‌های الکتریکی بر میدان‌های جریان سیّال باید عدد رینولدز پایین باشد.



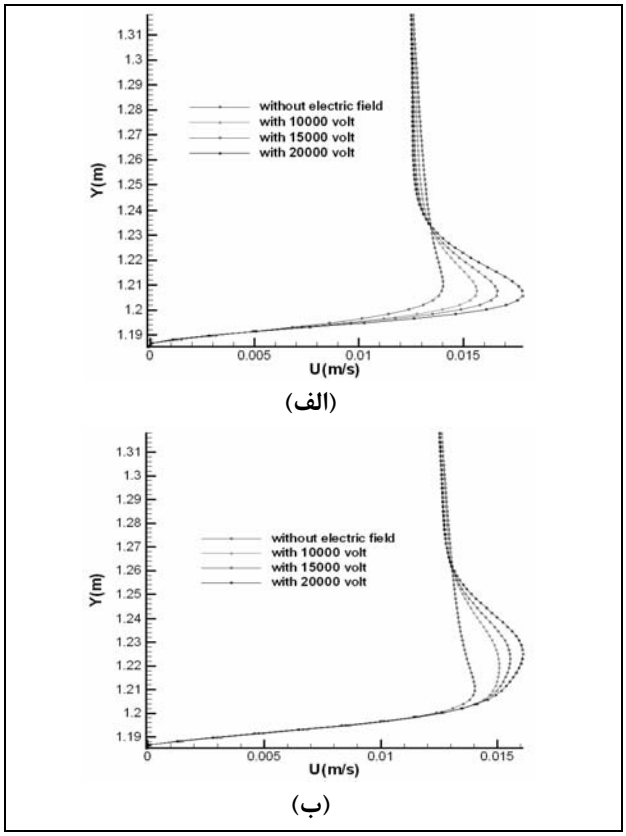
شکل ۶. کانتور سرعت در حالتهای بدون اعمال ولتاژ (شکل اول) و دوحالت مختلف قرارگیری الکترودها (شکلهای دوم و سوم) با ولتاژ اعمالی KV ۱۵ در رینولدز ۴۰



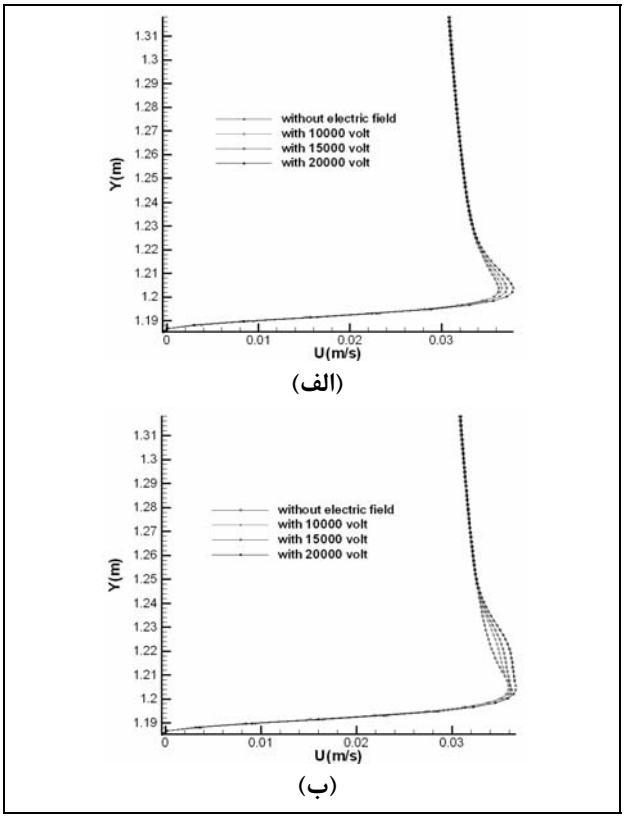
شکل ۷. کانتور سرعت در حالتهای بدون اعمال ولتاژ (شکل اول) و دوحالت مختلف قرارگیری الکترودها (شکلهای دوم و سوم) با ولتاژ اعمالی KV ۱۵ در رینولدز ۱۰۰

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

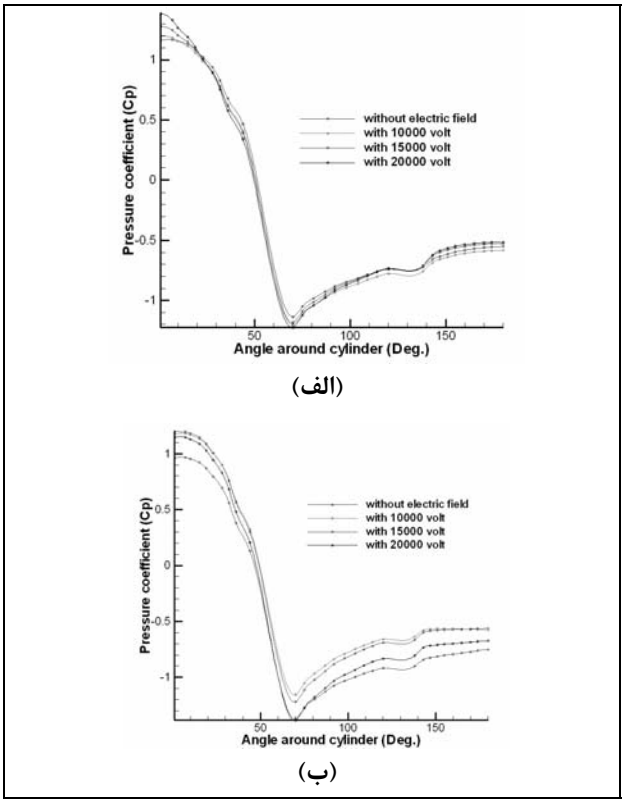
در اشکال ۸ و ۹ نمودار سرعت افقی در لایه مرزی بالای استوانه و در زاویه ۹۰ درجه در دو عدد رینولدز مختلف در حالت‌های با و بدون اعمال میدان الکتریکی و با آرایش‌های مختلف الکترودها نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود اثرات اعمال میدان الکتریکی بسته به رژیم جریان و ولتاژ اعمالی و حتّی نحوه قرارگیری الکترودها متفاوت است. امّا آنچه مسلم است این اثرات در عدد رینولدز ۴۰ نسبت به عدد رینولدز ۱۰۰ بیشترند. همچنین با افزایش ولتاژ نیز این اثرات نمود بیشتری می‌یابند. بنابراین بنظر می‌رسد که برای رسیدن به هدفی خاص باید یک حالت بهینه بین ولتاژ اعمالی و هندسه الکترودها برقرار کرد. همچنین نمی‌توان به تأثیر میدان الکتریکی بر جریان سیّال در اعداد رینولدز بالا امیدوار بود. در نمودار مربوط به عدد رینولدز ۴۰ مشاهده می‌شود که اعمال اختلاف پتانسیل به الکترودها باعث شتاب گرفتن جریان در لایه مرزی نزدیک به استوانه خواهد شد و پروفیل سرعت را در این ناحیه تغییر خواهد داد. در حالت a/r= ۱/۶۷ یعنی در حالت قرارگیری الکترودها با فاصله زیاد، تغییرات پروفیل لایه مرزی سرعت به نواحی بالاتر کشیده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که هر چه اختلاف ولتاژ اعمالی بیشتر باشد، تغییرات پروفیل سرعت در لایه مرزی بیشتر است. در عدد رینولدز ۱۰۰ نیز با بیشترکردن فاصله الکترودها، تغییرات سرعت به نواحی بالاتر کشیده می شود، اگر چه این تغییرات در مقایسه با عدد رینولدز ۴۰ کمترند.



شکل ۸. پروفیل سرعت در لایه مرزی بالای استوانه در Re= ۴۰ الف) a/r= ۰/۶۷ ب) a/r= ۱/۶۷



شکل ۹. پروفیل سرعت در لایه مرزی بالای استوانه در Re= ۱۰۰ الف) a/r= ۰/۶۷ ب) a/r= ۱/۶۷



شکل ۱۰. نمودار مقایسه ضرایب فشار در نیمه بالایی استوانه با اعمال میدان های الکتریکی مختلف در الف) Re= ۴۰ ب) Re= ۱۰۰

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

نمودارهای مربوط به ضریب فشار حول استوانه، در دو عدد رینولدز ۴۰ و ۱۰۰ و در حالت‌های بدون اعمال میدان الکتریکی و همراه با اعمال میدان الکتریکی در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.

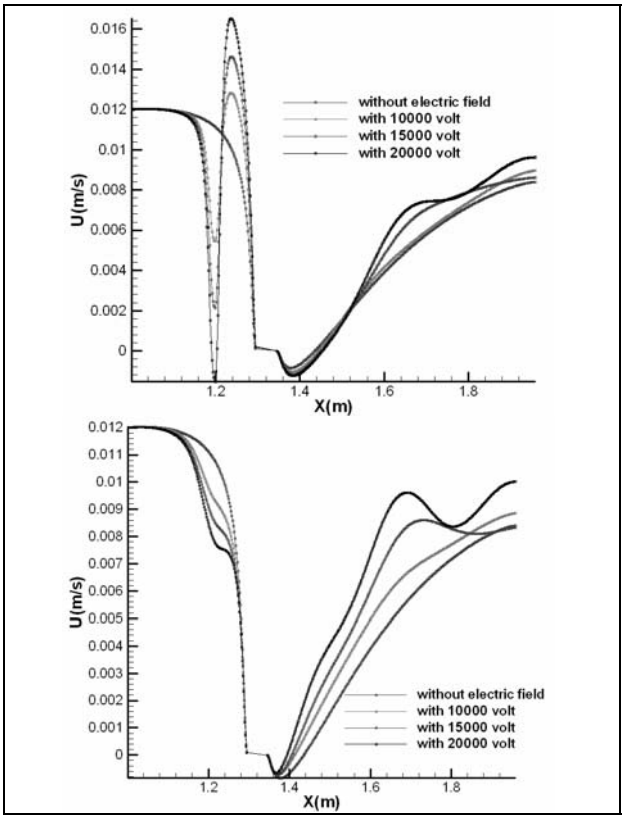
در این نمودارها زاویه حول استوانه از نقطه سکون جلوی استوانه شروع شده و تا ۱۸۰ درجه، یعنی نقطه مقابل آن ادامه می‌یابد. همان طوری که مشاهده می‌شود نمودارها تقریباً بر هم منطبقند، هرچند در عدد رینولدز ۱۰۰ بعد از جدایش لایه مرزی اندکی تفاوت بین نمودارها مشاهده می‌شود.

بنابراین می توان نتیجه گیری کرد که اعمال میدان الکتریکی تأثیری آنچنانی بر ضریب فشار حول استوانه نمی‌گذارد. عموماً تأثیرات اعمال میدان‌های الکتریکی در جریان حول استوانه، بعد از استوانه ظاهر می‌شود.

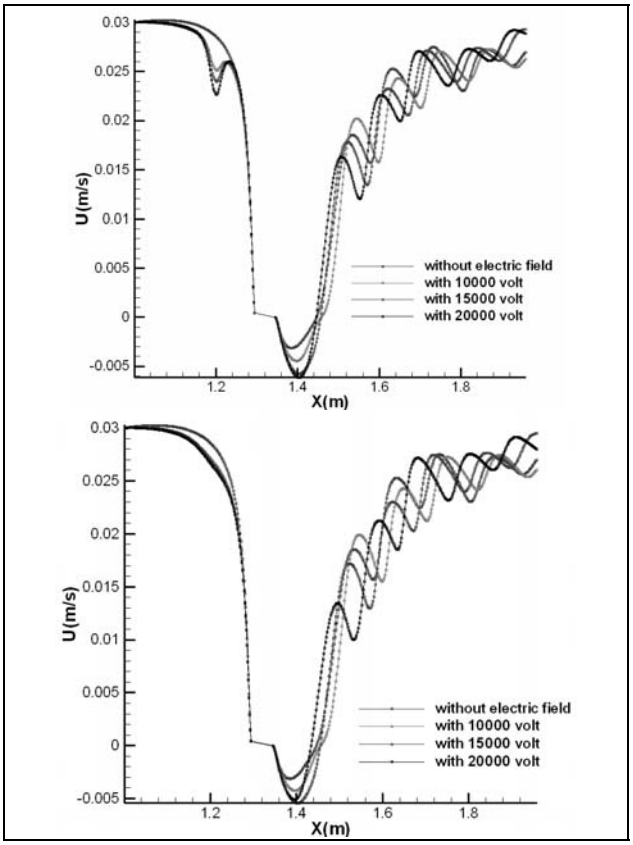
نمودارهای مربوط به سرعت در امتداد خط مرکزی افقی کانال در دو عدد رینولدز ۴۰ و ۱۰۰، و در دو حالت مختلف قرارگیری الکترودها در اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده اند. ملاحظه می‌شود که در عدد رینولدز ۴۰ اعمال میدان الکتریکی باعث بالا رفتن نمودار یعنی افزایش سرعت در پایین دست استوانه می‌شود. در حالت قرارگیری با فاصله زیاد الکترودها در عدد رینولدز ۴۰، جریان بعد از عبور از استوانه علاوه بر افزایش سرعت، نامتقارن می‌شود. این عدم تقارن در فاصله کم الکترودها کمتر است.

بنابراین می‌توان نتیجه گیری کرد که حضور الکترودها، به خصوص با فاصله زیاد از هم، باعث ناپایداری جریان بعد از عبور از استوانه می شود. همچنین حضور این الکترودها قبل از استوانه، در حالتی که نزدیک به هم قرار گرفته باشند، باعث ایجاد جریان برگشتی قبل از برخورد به استوانه و آشفتگی بسیار زیاد در جریان قبل از برخورد به استوانه می‌شود. البتّه در هنگام برخورد به استوانه سرعت بسیار بیشتر می‌شود. وقتی که فاصله الکترودها زیاد باشد (شکل ب)، حضور الکترودها تأثیر چندانی بر جریان ماقبل استوانه ندارد، ولی سرعت در پایین دست استوانه را بیشتر افزایش می دهد و ناپایداری جریان نیز بیشتر است.

در عدد رینولدز ۱۰۰، اثرات اعمال میدان الکتریکی بر جریان پایین دست استوانه به صورت افزایش سرعت ظاهر نمی‌شود و تنها تأثیر آن در گردابه‌های پایین دست جریان است که تناوب گردابه ها را تغییر می‌دهد. البته بلافاصله بعد از استوانه سرعت منفی، بیشتر می‌شود. یعنی سرعت جریان برگشتی بعد از استوانه افزایش می‌یابد. همچنین میزان آشفتگی که در جریان قبل از برخورد به استوانه به وجود می‌آید، نسبت به عدد رینولدز ۴۰ بسیارکمتر است. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که برای تأثیر میدان‌های الکتریکی بر میدان جریان سیّال باید عدد رینولدز کوچک باشد و با افزایش عدد رینولدز این تأثیر کاهش می‌یابد. همچنین محل قرارگیری الکترودها نیز بر چگونگی تأثیرگذاری میدان الکتریکی بر میدان جریان سیّال بسیار مهم است.



شکل ۱۱. پروفیل سرعت در امتداد خط المرکزین افقی کانال در Re= ۴۰ شکل اول) a/r= ۰/۶۷ شکل دوم) a/r= ۱/۶۷



شکل ۱۲. پروفیل سرعت در امتداد خط المرکزین افقی کانال در Re= ۱۰۰ شکل اول) a/r= ۰/۶۷ شکل دوم) a/r= ۱/۶۷

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

می‌دانیم که در مورد استوانه نیروی پسای فشاری نسبت به نیروی پسای اصطکاکی غالب است و اگر بتوانیم از این مؤلّفه بکاهیم در حقیقت از نیروی پسای کل کاسته‌ایم.

در جداول ۱ تا ۴ ضرایب پسای فشاری محاسبه شده در حالت های بدون اعمال میدان الکتریکی و با اعمال میدان‌های الکتریکی مختلف در دو عدد رینولدز ۴۰ و ۱۰۰ و همچنین درصد افزایش یا کاهش آنها مقایسه شده‌اند.

جدول ۱. ضرایب درگ محاسبه شده با و بدون اعمال میدان‌های الکتریکی مختلف در عدد رینولدز ۴۰ و نسبت a/r =۰/۶۷

	Without Electric field	*10 KV applied voltage*	*15 KV applied voltage*	**20 KV applied voltage**
Pressure drag	0.859	1.173	1.302	1.390
Friction drag	0.451	0.547	0.583	0.603
Total Drag	1.310	1.720	1.885	1.993
Percentage of increasing	-	31.3%	43.8%	52.1%

جدول ۲. ضرایب درگ محاسبه شده با و بدون اعمال میدان‌های الکتریکی مختلف در عدد رینولدز ۴۰ و نسبت a/r =۱/۶۷

	Without Electric field	*10 KV applied voltage*	*15 KV applied voltage*	**20 KV applied voltage**
Pressure drag	0.859	0.990	1.105	1.303
Friction drag	0.451	0.520	0.573	0.650
Total Drag	1.310	1.509	1.678	1.953
Percentage of increasing	-	15.2%	28.1%	49.0%

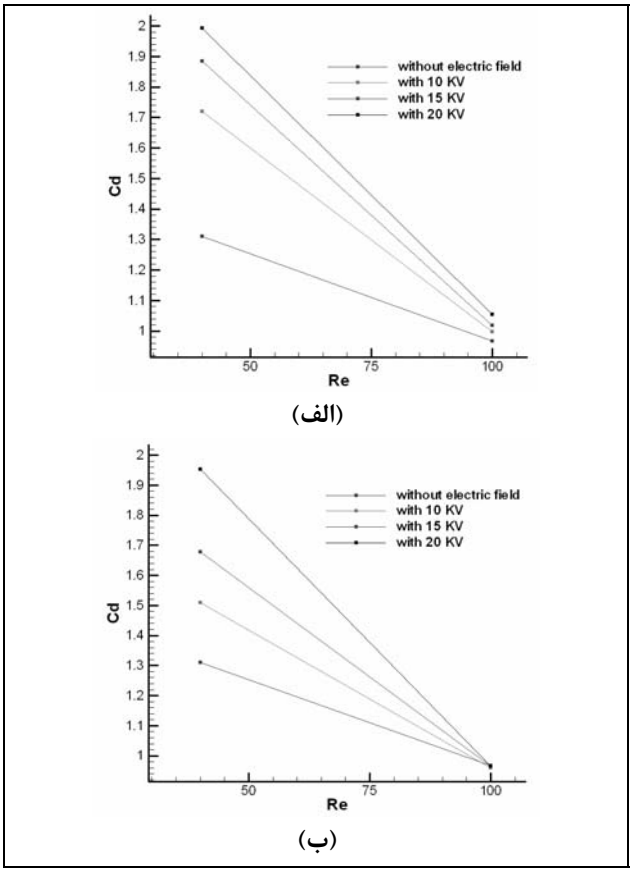
جدول ۳. ضرایب درگ محاسبه شده با و بدون اعمال میدان‌های الکتریکی مختلف در عدد رینولدز ۱۰۰ و نسبت a/r =۰/۶۷

	Without Electric field	***10 KV applied voltage***	***15 KV applied voltage***	**20 KV applied voltage**
Pressure drag	0.742	0.760	0.778	0.809
Friction drag	0.225	0.238	0.240	0.245
Total Drag	0.968	0.997	1.018	1.054
Percentage of increasing	-	3.1%	5.2%	8.9%

جدول ۴. ضرایب درگ محاسبه شده با و بدون اعمال میدان های الکتریکی مختلف در عدد رینولدز ۱۰۰ و نسبت a/r =۱/۶۷

	Without Electric field	*10 KV applied voltage*	*15 KV applied voltage*	**20 KV applied voltage**
Pressure drag	0.742	0.727	0.731	0.730
Friction drag	0.225	0.233	0.234	0.235
Total Drag	0.968	0.960	0.965	0.965
Percentage of increasing	-	-0.8%	-0.3%	-0.2%

در عدد رینولدز ۱۰۰ و در حالت قرارگیری نزدیک الکترودها، با افزایش ولتاژ، ضریب پسا به میزان بسیار کمی در مقایسه با عدد رینولدز ۴۰ افزایش می‌یابد. در حالت قرارگیری دور الکترودها مشاهده می‌شود که ضرایب پسا با اعمال ولتاژ کاهش می یابند. این کاهش اگرچه بسیار کم است، ولی نشان دهنده این نکته است که چگونگی تأثیر بر ضریب پسا وابسته به رژیم جریان و هندسه الکترودهاست. یعنی می‌توان حالت هایی از جریان و هندسه الکترودها را یافت که با اعمال میدان نیروی پسا کاهش یابد. همچنین می‌توان به این نکته پی برد که تأثیر بر ضریب پسا با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳. نمودار ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت مختلف قرارگیری الکترودها الف) نزدیک ب) دور

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر اعمال میدان الکتریکی بر جریان سیال حول استوانه پرداخته شد. میدان جریان سیّال در دو عدد رینولدز ۴۰ و ۱۰۰، در حالت‌های بدون اعمال میدان الکتریکی و با اعمال میدان‌های الکتریکی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوولت حل شد.

نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر این میدان‌ها بر جریان سیّال به خصوص در نزدیکی نواحی است که تخلیه الکتریکی در آنجا اتفاق می‌افتد. با توجّه به اینکه از دو الکترود سیمی و دو الکترود صفحه‌ای برای تأثیرگذاری استفاده شد، مشاهده شد که نحوه قرارگیری الکترودها و هندسه مسأله بر چگونگی تأثیر بر جریان بسیار موثر است.

اما در تمامی حالت‌ها افزایش سرعت در لایه مرزی مشاهده شد، که حاکی از افزایش مومنتم ذرّات سیال در اثر اعمال میدان الکتریکی است. همچنین این تأثیر در اعداد رینولدز پایین به نسبت بیشتر است. در بررسی ضریب فشار حول استوانه نیز با استفاده از نتایج حاصله نمی توان نقشی را برای تخلیه الکتریکی قائل شد. ضریب پسای اعمال شده بر استوانه نیز مورد بررسی قرار گرفت. در مورد ضریب پسا مشاهده شد که چگونگی تأثیر بر این پارامتر به شدّت تابع هندسه مسأله، ولتاژ اعمالی و رژیم جریان است. در مورد این مسأله نیروی پسا افزایش یافت. بسته به هدف مورد نظر و کاربرد مسأله می‌توان روی کاهش پسا یا افزایش انتقال حرارت متمرکز شد.

بهر حال مسأله حل هم زمان میدان‌های جریان سیّال و الکتریسیته بسیار پیچیده می باشد و در صورت صرف نظر نکردن از جملاتی که باعث استقلال معادلات میدان‌های الکتریکی و سیّال می شوند، حل مسأله بسیار مشکل تر خواهد شد. به خصوص اینکه در حل میدان های الکتریکی به دست آوردن چگالی بار الکتریکی ناشی از یک بار نقطه ای در هر نقطه از فضا، بدلیل مقدار بسیار کم آن و وابستگی آن به تمامی عوامل موجود، خود مشکلی مضاعف است.

فهرست علائم

$\vec{D}$	شار جابجایی الکتریکی ، c/m^2
$\vec{E}$	بردار شدت میدان الکتریکی ، $N.m/c$
$\vec{P}$	بردار قطبش ، c/m^2
$\vec{J}$	چگالی کلی جریان الکتریکی ، cm/s
$\vec{u}$	سرعت ، m/s
$\vec{V}$	اختلاف پتانسیل ، $J/c=V$
Δx	اختلاف مکانی در راستای افقی ، m
Δy	اختلاف مکانی در راستای عمودی ، m
a	ضریب مربوط به هر گره در معادله گسسته شده
b	ترم چشمه در معادله گسسته شده ، $-\rho_P{}^2\Delta V/\varepsilon_0$

علائم یونانی

ρ_e	چگالی موضعی بار الکتریکی حجمی، c/m^3
ε_0	ضریب گذردهی فضای آزاد یا خلا، $c^2/N.m^2$
σ	ضریب قابلیت هدایت الکتریکی، $c^2/N.s$
μ_e	ضریب تحرک پذیری، $c.m^3/N.s$
Γ	ثابت پخش
φ	خاصیت دلخواه در معادله مومنتم

زیرنویس

p	ضریب گره مرکزی سلول
n	ضریب گره شمالی سلول
s	ضریب گره جنوبی سلول
e	ضریب گره شرقی سلول
w	ضریب گره غربی سلول

منابع

[1] Bergles, A.E., *"The Challenge of Enhanced Heat Transfer with Phase Change. Transe,"* VII Congresso Nazionale sulla Transmissione del Calore, Florence, 1989, PP. 1-12.

[2] Bergles, A.E., *"Techniques to Augment Heat Transfer,"* In Handbook of Heat Transfer Applications (Edited by W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett and E.N. Ganic), 2nd Edn. McGraw-Hill, New York, 1985.

[3] Yabe, A., *"Active Heat Transfer Enhancement by Applying Electric Fields,"* Proc. ASME/JSME Thermal Engng Joint Conf. (Edited by J.R. Lloyd and Y. Kurosaki), 1991, PP.xv-xxiii.

[4] Luc Leger, Eric Moreau, Guillermo Artana, Gerard Touchard, *"Influence of a DC Corona Discharge on the Airflow Along an Inclined Flat Plate,"* Universidad de Buenos Aires, Argentina BP 30179,86962, Futuroscope, 1991.

[5] Owsenek, B.L., *"An Experimental, Theoretical, and Numerical Investigation of Corona wind Heat Transport Enhancement,"*. M.Sc. thesis A & M University, 1991.

[6] Seyed-Yagoobi, J., Owsenek, B.L., *"Theoretical and Experimental Study of Electrohydrodynamic Heat Transfer Enhancement Through Wire-Plate Corona Discharge,"*. Journal of Heat Transfer, Vol.119, 1997.

[7] Melcher, J.R., Taylor, G.I.,. *"Electrohydrodynamics Enhancement of Heat Transfer and Fluid Flow,"*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

Recovery systems & CHP, Vol.15, No.5, 1995, PP.389-423.

[8] Melcher, J.R., "*Continuum Electromechanics*," Cambridge, Mass, MIT Press, 1981.

[9] Seyed-Yagoobi, J.,Bryan, J.E., "*Enhancement of Heat Transfer and Mass Transport in Single-Phase and Two-Phase Flows with Electrohydrodynamics*," Texas A&M University College Station Texas 77843-3123, 1981.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]