

شبیه‌سازی الکتروهیدرودینامیک اثر عملگر پلاسمایی بر جریان سیال با اصلاح شرط مرزی در مدل سوزن- هوانگ

جواد امیدی^۱

کارشناسی ارشد

کریم مظاهری^۲

استاد

عملگر پلاسمایی از کارآمدترین و مطمئن‌ترین روش‌های کنترل فعال جریان سیال شناخته می‌شود. یکی از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی اثر عملگر بر جریان سیال، مدل سوزن- هوانگ است که در آن با حل دو معادله بیضوی برای پتانسیل الکتریکی و غلظت شارژ، اثر عملگر به صورت ترم‌های چشمه به معادلات ناویر- استوکس افزوده می‌گردد. در این پژوهش شرط مرزی جدیدی برای توزیع شارژ بر روی سطح دی‌الکتریک پیشنهاد می‌شود که ارتباطی را میان دو معادله بیضوی برقرار می‌کند. نتایج مطالعه نشان می‌دهند مدل ارتقایافته در شبیه‌سازی ساختار لایه مرزی کنترل‌شده در جریان عبوری از ایرفویل و صفحه تخت دارای دقت بالایی است.

واژه‌های راهنما: عملگر پلاسمایی، کنترل فعال جریان سیال، مدل سوزن- هوانگ، ارتقای شرط مرزی

۱- مقدمه

عملگرهای پلاسمای DBD یکی از کارآمدترین و در عین حال کم‌هزینه‌ترین عملگرهای تولید شارژ پلاسمای در شرایط اتمسفر شناخته شده‌اند. شروع مطالعات بر روی این عملگر و شناخت آن به عنوان یک وسیله کنترل جریان سیال به سال (۱۹۹۸) و پژوهش روث [۱] بر می‌گردد. با این حال شناخت این پدیده سابقه طولانی‌تری نیز دارد و اولین پژوهش‌ها بر روی آن به سال (۱۹۸۷) [۲] نیز می‌رسد. در یک معنای کلی ترکیب واژگانی "عملگر پلاسمایی" شامل تمام تخلیه‌های الکتریکی در فشار اتمسفر مانند Corona [۳]، Dielectric Barrier [۴]، Glow [۵] و Arc Discharge [۶] می‌شود. اما آنچه امروز به عنوان عملگر پلاسمای DBD شناخته می‌شود، شکل نامتقارن عملگرهای Dielectric Barrier است. عملگر پلاسمای DBD از دو الکتروود تشکیل شده است که توسط یک لایه دی‌الکتریک از یکدیگر جدا شده‌اند. الکتروود بیرونی در معرض جریان هوا بوده و منبع تأمین ولتاژ به آن وصل می‌شود. الکتروود درونی نیز در درون لایه دی‌الکتریک پنهان است و با ولتاژ صفر نقش زمین را ایفا می‌کند. در ولتاژهای به اندازه کافی بزرگ (بالتر از ولتاژ بحرانی) عملگر موجب یونیزه شدن مولکول‌های هوا می‌شود.

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوا فضا، دانشگاه صنعتی شریف jomidi@alum.sharif.ir
^۲ نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف mazaheri@sharif.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۰۹، تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۶/۰۲

ذرات باردار حاصل در مجاورت میدان الکتریکی حاکم به ذرات خنثی هوا مومنتوم منتقل می‌کنند و بدین ترتیب جریانی از سمت الکتروود بیرونی به سمت الکتروود نهان شکل می‌گیرد. این اثر به شکل یک جت دیواره خود را نشان می‌دهد که حداکثر سرعت آن معمولاً کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه است [۷].

از جمله مهمترین ویژگی‌های این عملگر، هزینه کم در ساخت، توان مصرفی پایین، ابعاد کوچک، وزن کم، نصب آسان و عدم نیاز به اجزای متحرک و سیستم‌های نیوماتیکی و هیدرولیکی است. تمام این ویژگی‌ها، سبب جلب توجه پژوهشگران برای استفاده از این عملگر در کاربردهای مختلفی شده است. از جمله این کاربردها می‌توان به این موارد اشاره داشت: استفاده از عملگر پلاسمایی در کنترل جریان عبوری از تیغه توربین‌های باد و ارتقای توان تولیدی و افزایش زمان کارایی مفید آن [۸، ۹]، استفاده از آن در ارباه فرود هواپیما برای کاهش نویز در حین فرود وسیله هوایی [۱۰]، استفاده در افزایش بازده تیغه توربین‌های گاز کم فشار [۱۱]، کنترل گردابه‌های نوک بال [۱۲]، کاهش درگ [۱۳]، کنترل ضرایب آیرودنامیکی ایرفویل در حالت استاتیکی و نوسانی [۱۴] و همچنین کنترل جریان عبوری از رژیم آرام به آشفته [۱۵].

تحلیل و آنالیز محاسباتی این پدیده به علت ترکیب پدیده یونیزاسیون و اندرکنش جریان سیال و میدان الکتریکی حاکم بسیار پیچیده و دشوار است. چرا که برای حل دقیق این پدیده در شرایط مشخص، باید دو معادله ماکسول و ناویر-استوکس با یکدیگر ترکیب شوند. بدین ترتیب این ترکیب غیرخطی حلی بسیار دشوار و پرهزینه خواهد داشت. با این حال مدل‌های عددی مختلفی برای شبیه‌سازی اثر عملگر پلاسمایی در اندرکنش آن با جریان سیال در طول ده سال گذشته ارائه شده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به این موارد اشاره داشت: مدل ارائه شده توسط روث [۱۶]، مدل الکتروستاتیک ارائه شده توسط سوزن و هوانگ [۱۷، ۱۸]، مدل المانهای متمرکز مداری ارائه شده توسط اورلو و همکارانش [۱۹]، مدل نیروی خطی شده ارائه شده توسط جایارامن و شای [۲۰]، مدل جریان پتانسیل هال [۲۱] و مدل حل کامل معادلات ماکسول بدون صرف نظر از ترم‌های مغناطیسی [۲۲].

مدل ارائه شده توسط سوزن و هوانگ (مدل SH) [۱۷]، با حل دو معادله بیضوی مستقل و مجزا از معادلات جریان سیال، یک نیروی حجمی را تولید می‌کند. این نیروی حجمی به عنوان ترم‌های چشمه‌ی اثر عملگر پلاسمایی به معادلات مومنتوم جریان سیال اضافه می‌شود. در این مدل از یک تابع گوسی برای توزیع شارژ بر روی سطح دی‌الکتریک استفاده شده است که منطبق بر مشاهدات آزمایشگاهی نیز می‌باشد. در راستای ارتقای مدل عددی SH تلاش‌هایی صورت گرفته است. این تلاش‌ها برای رفع نیازمندی پارامترهای این مدل از کالیبراسیون با استفاده از نتایج تجربی صورت پذیرفته است [۲۳، ۲۴، ۲۵]. با این حال بسیاری از رابطه‌های میان پارامترها که در تست‌های تجربی دیده می‌شود در مدل‌های عددی قابل دسترسی نیستند.

یک ایراد اساسی این مدل مستقل بودن غلظت پلاسمای تولیدی از ولتاژ اعمالی بر الکترودهاست. در واقع این مدل برای یک عملگر با مشخصات هندسی و عملکردی خاص، کارایی دارد و برای مدل کردن شکل‌های دیگر عملگر و مخصوصاً ولتاژهای اعمالی مختلف دارای نقص است. این مسئله به علت جدا بودن معادلات اساسی الکترواستاتیک از هم در این مدل به وجود می‌آید. بوجمال [۲۶] در راستای امکان استفاده از این مدل برای شکل‌های مختلف عملگر با ولتاژهای ورودی مختلف، فرضیه‌هایی را بر مبنای نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌کند. او با استناد به نتایج آزمایشگاهی، رابطه‌هایی را برای محل ماکزیمم توزیع گوسی، ضریب تغییرات

توزیع گوسی، طول دبابی و ماکزیمم غلظت پلاسمای تولیدی بر حسب تغییرات ولتاژ اعمالی ارائه می‌دهد. بدین ترتیب قانون $\frac{7}{2}$ برای مدل SH ارضا می‌شود. این قانون تجربی نشان می‌دهد که نیروی حجمی تولیدی با توان $\frac{7}{2}$ دامنه ولتاژ اعمالی متناسب است. ایراد دیگری که بر این مدل وارد است این است که اثر طول الکترودها، فاصله افقی و عمودی الکترودها، ضخامت آن‌ها و در مجموع تمام پارامترهای درگیر در هندسه‌ی عملگر در حل معادله توزیع پتانسیل و توزیع شارژ مشاهده نمی‌شود. همچنین اثر فرکانس ولتاژ اعمالی و جنس دی‌الکتریک نیز در آن لحاظ نشده است.

نویسندگان مقاله در کارهای پیشین خود در سال (۲۰۱۶) [۲۷] در یک کار پژوهشی با استفاده از نتایج تجربی معتبر، مدلی را برای تخمین طول گسترش پلاسمای تولیدی بر روی سطح دی‌الکتریک ارائه کرده‌اند که اثرات هندسه عملگر و ولتاژ و فرکانس ورودی را در خود دارد. همچنین در این کار با ترکیب شرایط مرزی مختلف ارائه شده در کارهای مختلف، یک مدل پدیده‌ای جدید ارائه شده است که دقت آن در مقایسه با مدل‌های پیشین بالاتر می‌باشد. سپس با استفاده از این مدل، اثر ولتاژ و فرکانس ورودی به عملگر در کنترل جریان عبوری از یک ایرفویل توربین باد بررسی شده و همچنین اثر استفاده از عملگرهای دوتایی و محل نصب عملگرهای پلاسمایی در کنترل جریان عبوری از ایرفویل در بازه گسترده‌ای از زوایای حمله مدل‌سازی و تحلیل شده است. در کار دیگری در سال (۲۰۱۶) [۲۸] مدل پیشنهادی بوچمال [۲۶] برای شبیه‌سازی اثر عملگر پلاسمایی در اندرکنش آن با جریان سیال برای یک سطح دارای انحنا بررسی شده است. برای این منظور از ایرفویل معروف ناکا ۰۰۱۵ برای بررسی اثرپذیری ضرایب آیرودینامیکی از کارکرد عملگر پلاسمایی استفاده شده است. نتایج بهبود قابل توجهی را در زوایای حمله بعد از واماندگی نشان داده‌اند.

در سال (۲۰۱۵) [۲۹] از مدل الکتروستاتیک سوزن و هوانگ [۱۷] و ارتقای پیشنهادی بوچمال [۲۶] برای کنترل فروریزش گردابه‌های ون-کارمن از یک سیلندر دوبعدی استفاده شده است. رینولدز جریان مورد بررسی در این کار ۲۰ هزار بوده و عملگر در دو موقعیت متقارن در بالا و پایین سیلندر نصب شده است. بهبود ۴۰ تا ۵۵ درصدی در تغییرات ضریب برآ و ۷۵ تا ۹۰ درصدی در مقدار ضریب پسا در این کار گزارش شده است. همچنین در سال (۲۰۱۴) [۳۰] برای اولین بار از مدل‌های نوین شبیه‌سازی اثر عملگر پلاسمایی در اندرکنش آن با جریان سیال بر روی سطوح صاف و دارای انحنای مختلفی با رویکردی کاربردی استفاده شده که میزان دقت مدل در مقایسه با نتایج تجربی و سایر مدل‌های عددی به دقت گزارش شده است. از جمله موارد مورد بررسی و شبیه‌سازی می‌توان به جریان کنترل شده عبوری از سیلندر دوبعدی و ایرفویل‌های لاغر و چاق اشاره کرد. در این کار همچنین اثر موقعیت قرارگیری عملگر پلاسمایی در کنترل جریان عبوری از جسم آیرودینامیکی نیز بهینه می‌شود.

در پژوهش حاضر، در مدل عددی سوزن-هوانگ با ایجاد ارتباط میان دو معادله مستقل بیضوی، شرط مرزی جدیدی برای توزیع شارژ بر روی سطح دی‌الکتریک به جای توزیع گوسی پیشنهاد شده است. با توجه به نتایج استفاده از این شرط مرزی در شبیه‌سازی لایه مرزی کنترل شده بر روی سطح دارای انحنای ایرفویل و صفحه تخت، دقت شرط مرزی ارتقایافته مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از ترکیب کارهای تحلیلی و عددی پیشین در منابع معتبر علمی، از فرمولاسیون جدیدی در راستای ارتقای مدل پایه‌ای سوزن-هوانگ استفاده شده است که دقت شبیه‌سازی ساختار لایه مرزی را نیز بهبود می‌بخشد.

۲- معادلات حاکم بر مدل ارتقایافته

۱-۲- مدل سوزن- هوانگ

مدل سوزن و هوانگ [۱۷] با فرض داشتن زمان کافی برای تولید پیوسته شاره پلاسما و شبه پایا در نظر گرفتن تولید آن، ارائه گردیده است. بدین ترتیب با اعمال فرض‌های ساده‌کننده در مجموعه معادلات ماکسول، سوزن و همکارانش [۱۷] دو معادله زیر را برای توزیع میدان پتانسیل الکتریکی و توزیع غلظت شارژ ارائه کرده‌اند:

$$\nabla E = \nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (۱)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla q_c) = \frac{q_c}{\lambda_d^2} \quad (۲)$$

که در آن ϕ پتانسیل الکتریکی، λ_d طول دبابی و ϵ_r ، نفوذپذیری الکتریکی نسبی است.

هنگامی که یک ولتاژ بالا میان دو الکتروُد جدا شده توسط لایه دی‌الکتریک اعمال می‌شود، یک فرایند یونیزاسیون ناپایا به وقوع می‌پیوندد که در مقیاس‌های زمانی میلی‌ثانیه جریان هوا از آن اثر می‌پذیرد. حضور ذرات باردار ناشی از این فرایندها در میدان الکتریکی حاکم، در مقیاس زمانی اثرپذیری جریان، یک نیروی حجمی را بر جریان سیال خارجی اعمال می‌کند. این نیروی حجمی با استفاده از رابطه معروف لورنتز و با صرف نظر کردن از اثر نیروهای مغناطیسی به صورت رابطه (۳) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\vec{f}_b = q_c \vec{E} \quad (۳)$$

که در آن q_c غلظت پلاسما بر حسب C/m^3 و \vec{E} بردار میدان الکتریکی است. بدین ترتیب با حل دو معادله اساسی به دست آمده توسط سوزن و هوانگ برای توزیع میدان پتانسیل الکتریکی (رابطه (۱)) و غلظت شارژ (رابطه (۲))، نیروی حجمی تولیدی با توجه به معادله لورنتز (رابطه (۳)) حاصل می‌شود.

معادله پتانسیل الکتریکی (۱) هم در قسمت دی‌الکتریک و هم در قسمت سیال حل می‌شود. شرایط مرزی برای حل معادله پتانسیل بدین صورت است که بر روی مرز بیرونی، $\partial \phi / \partial n_i = 0$ ، بر روی سطح الکتروُد خارجی، $\phi = \phi(t)$ و بر روی سطح الکتروُد داخلی، $\phi = 0$ برقرار هستند. n_i در این رابطه بردار عمودی یکانی سطح است و $\phi(t) = \phi^{max} f(t)$ تغییرات تناوبی ولتاژ اعمالی تعریف می‌شود.

معادله غلظت پلاسما (۲) تنها در قسمت سیال حل می‌شود و شرایط مرزی برای حل این معادله بدین صورت است که بر روی مرز بیرونی، $q_c = 0$ ، بر روی سطحی از دی‌الکتریک که الکتروُد داخلی را می‌پوشاند، $q_c = q_c^{max} G(x) f(t)$ و برای بقیه سطوح دی‌الکتریک و الکتروُد خارجی، $\partial q_c / \partial n_i = 0$ برقرار هستند.

بنا بر پیشنهاد سوزن و هوانگ [۱۷] می‌توان توزیع فضایی غلظت شارژ را با توجه به مشاهدات تجربی با یک توزیع گوسی $G(x)$ تقریب زد که از ضلع مشترک دو الکتروُد تا قسمتی از سطح دی‌الکتریک که الکتروُد داخلی را پوشانده است پیشروی می‌کند. این توزیع گوسی به شکل رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$G(x) = \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

x موقعیت محوری هر نقطه از سطح دی‌الکتریک و x_0 نیز موقعیت ماکزیمم مقدار توزیع و σ پارامتر تنظیم‌کننده ضخامت توزیع گوسی می‌باشد.

۲-۲- شرط مرزی ارتقایافته برای توزیع شارژ

یکی از نواقص مدل عددی معرفی شده توسط سوزن و هوانگ [۱۷] عدم تغییر غلظت شارژ با افزایش ولتاژ اعمالی است که به علت مجزا بودن معادلات حاکم بر مدل آن‌ها اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب این مدل تنها برای هندسه و شرایط کاکردی مشخصی که در کار سوزن و هوانگ اشاره شده کاربرد خواهد داشت. از این رو در کار حاضر شرط مرزی جدیدی به جای توزیع گوسی بر روی سطح شارژ مورد استفاده قرار گرفته است که این شرط مرزی ارتباطی را میان دو معادله بیضوی حاکم بر مدل پیاده می‌کند. در این شرط مرزی جدید از توزیع میدان پتانسل الکتریکی بر روی سطح شارژ به عنوان شرط مرزی توزیع غلظت شارژ در طول گسترش پلازما به صورت فرمولاسیون رابطه (۵) استفاده می‌شود.

$$0 < x < 17\% \quad q_c(x) = q_c^{max} \left(\frac{\phi_{max}^{local} - \phi}{\phi_{max}^{local} - \phi_{17\%}} \right) \quad (5)$$

$$17\% < x < 100\% \quad q_c(x) = q_c^{max} \left(\frac{\phi - \phi_{min}^{local}}{\phi_{17\%} - \phi_{min}^{local}} \right)$$

برای تعریف شرط مرزی ارائه شده در این پژوهش از مشاهدات آزمایشگاهی توزیع شارژ در نیم‌سیکل مؤثر از ولتاژ اعمالی به عملگر پلاسمایی در کار پژوهشی کریستوفولینی و همکارانش [۳۱] استفاده شده است. در پژوهش آن‌ها با اندازه‌گیری شارژ در هر نیم‌سیکل ولتاژ اعمالی به ویژه در نیم‌سیکل مثبت مقدار ماکزیمم شارژ در نقطه‌ای به فاصله ۱۷ درصد طول گسترش شارژ از لبه فرار الکتروود بیرونی قرار خواهد داشت.

۲-۳- شکل ارتقایافته پارامترهای مدل سوزن - هوانگ

می‌توان با تقریب خوبی، نیروی پیشران تولیدی توسط عملگر پلاسمایی را متناسب با توان مصرفی عملگر دانست. به همین علت یکی از راه‌های مناسب برای محاسبه نیروی پیشران تولیدی توسط عملگر، محاسبه توان مصرفی مدار الکتریکی AC معادل با عملکرد عملگر پلاسمایی است. یون و همکارانش [۷] مدار معادلی متشکل از دو خازن را مطابق شکل (۱) برای عملکرد عملگر پلاسمایی در نظر گرفته‌اند.

شکل (۱) عملگر پلاسمایی را به همراه مدار الکتریکی معادل با آن که دو خازن سیلندری را شامل می‌شود، نشان می‌دهد. C_d ظرفیت خازن شامل الکتروود درونی و دی‌الکتریک می‌باشد، C_g ظرفیت خازنی است که الکتروود بیرونی و پلاسمای تولیدی را شامل شده و سطح سیلندری آن منطبق بر سطح دی‌الکتریک است.

با استفاده از تعاریف پایه‌ای الکتروستاتیک، ظرفیت‌های دو خازن در مدار معادل عملگر پلاسمایی به صورت روابط (۶) و (۷) به دست می‌آیند.

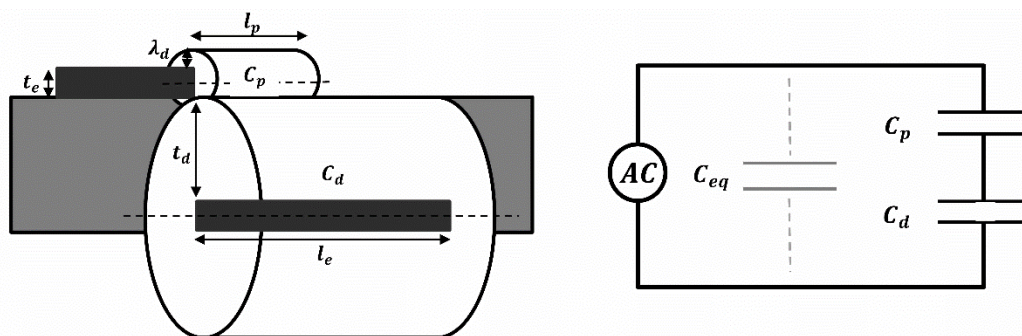
$$C_g = 2\pi\epsilon_0 \frac{l_p}{\ln\left(\frac{0.5t_e + \lambda_d}{0.5t_e}\right)} \quad (۶)$$

$$C_d = 2\pi\epsilon_d \frac{l_e}{\ln\left(\frac{0.5t_e + 2t_d}{0.5t_e}\right)} \quad (۷)$$

در این روابط V_{app} دامنه ولتاژ اعمالی به عملگر پلاسمایی، t_e ضخامت الکتروود بیرونی، t_d ضخامت دی‌الکتریک، l_p طول گسترش پلاسمای تولیدی بر روی سطح دی‌الکتریک، l_e طول الکتروود درونی، ϵ_0 ضریب نفوذپذیری الکتریکی خلأ و ϵ_d ضریب نفوذپذیری الکتریکی دی‌الکتریک می‌باشد.

با توجه به تعریف ظرفیت دو خازن معرفی شده، می‌توان تنها تفاوت میان این دو تعریف را در این مسئله دانست که در ظرفیت خازن C_d از طول l_e استفاده شده است که با توجه به هندسه عملگر پلاسمایی معلوم است، اما در تعریف C_g از طول l_p استفاده شده است که معلوم نیست و متناسب با شرایط کارکردی عملگر متغیر خواهد بود. همچنین با توجه به پژوهش انجام شده توسط بوچمال [۲۶] طول دبای از رابطه (۸) محاسبه و در روابط اعمال می‌شود. در این رابطه دامنه ولتاژ اعمالی به عملگر پلاسمایی برحسب کیلوولت است و طول دبای برحسب متر محاسبه می‌شود.

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، در این مدل‌سازی عملگر پلاسمایی با یک مدار معادل با ظرفیت خازنی معادل جایگزین شده است. بنابراین انرژی مصرفی عملگر پلاسمایی در بازه زمانی معین، معادل با انرژی مصرفی در خازن معادل در مدار الکتریکی عملگر خواهد بود. بدین ترتیب با فرض اینکه نیروی پیشران تولیدی توسط عملگر پلاسمایی متناسب با توان مصرفی آن است، یون و همکارانش [۷] رابطه (۹) را برای نیروی پیشران تولیدی ارائه می‌کنند.



شکل ۱- عملگر پلاسمای DBD به همراه مدار الکتریکی معادل با آن

$$\lambda_d = 0.2(0.3V_{app} - 7.42 \times 10^{-4}) \quad (۸)$$

$$T = \alpha f C_{eq} (V_{app} - V_{bd})^2 \quad (۹)$$

که در آن T نیروی پیشران تولیدی بر واحد طول عملگر پلاسمایی است و C_{eq} ظرفیت خازن معادل مدار است. V_{bd} ولتاژ بحرانی و یا ولتاژ شکست ولتاژی است که در آن اولین یونیزاسیون به وقوع می‌پیوندد. مرجع [۲۴] رابطه‌ی تحلیلی (۱۰) را برای ولتاژ شکست ارائه می‌کند.

$$V_{bd} = \pi B \sqrt{\frac{p t_d \ln(1 + \gamma^{-1})}{2A}} \quad (۱۰)$$

که در آن p فشار محیط کارکردی بر حسب $Torr$ و t_d ضخامت دی‌الکتریک بر حسب سانتی‌متر است و V_{bd} ولتاژ بحرانی بر حسب ولت از رابطه به دست می‌آید. همچنین ضرایب $A = 15 cm^{-1} Torr^{-1}$ و $B = 365 cm^{-1} Torr$ هستند. مرجع [۲۴] با به کارگیری روابط مختلف تجربی شکل جدیدی از رابطه نیروی پیشران را تولید می‌کند که در روابط (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است.

$$T = \alpha \left[4\rho l_p \left(2f \frac{C_{g0} l_p C_{d0} l_e}{C_{g0} l_p + C_{d0} l_e} (V_{app} - V_{bd})^2 \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (۱۱)$$

$$C_{g0} = \frac{C_g}{l_p}, \quad C_{d0} = \frac{C_d}{l_e} \quad (۱۲)$$

که در آن ρ چگالی گاز مورد نظر بر حسب kg/m^3 است.

از طرفی طبق نتایج آزمایشگاهی [۷] ابعاد ناحیه‌ای که در آن نیروی پیشران تولیدی مؤثر است، به شکل (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$l_p = 0.005 \left(\frac{T}{0.04} \right)^{0.5} \quad (۱۳)$$

$$h_p = 0.0018 \left(\frac{T}{0.04} \right)^{0.5} \quad (۱۴)$$

که در آن l_p و h_p طول و ارتفاع پلاسمای تولیدی بر حسب متر هستند.

با استفاده از رابطه به دست آمده برای نیروی پیشران تولیدی (۱۲)، می‌توان به کمک روابط (۱۳) و (۱۴) طول و ارتفاع پلاسمای تولیدی را محاسبه نمود. باید توجه داشت که در رابطه (۱۳) طول پلاسمای خود مجهول است و با قرار دادن رابطه نیروی پیشران در این رابطه یک معادله جبری به دست می‌آید که باید به صورت عددی

حل شود. برای حل این معادله از روش نیوتون-رافسون کلاسیک استفاده شده است. این معادله در روابط (۱۵) ارائه شده است که از نتایج پیشین پژوهش نویسندگان می‌باشد [۲۷].

$$a_1^2 l_p^5 + 2a_1 a_2 l_p^4 + a_2^2 l_p^3 = a_3^2$$

$$a_1 = 16000 C_{g0}$$

$$a_2 = 16000 C_{d0} l_e$$
(۱۵)

$$a_3 = \sqrt{\rho} f C_{g0} C_{d0} l_e (V_{app} - V_{bd})^2$$

از آنجا که حداقل طول پلاسمای تولیدی توسط نتایج آزمایشگاهی [۲۴] ۲/۵ میلی متر است با یک ضریب تصحیح می‌توان طول پلاسمای تولیدی بر روی سطح را طبق رابطه (۱۶) به دست آورد. در این رابطه l_p^{solved} طول پلاسمای به دست آمده از حل معادله است.

$$l_p^{corr} = \begin{cases} \alpha_{corr} l_p^{solved} & \alpha_{corr} l_p^{solved} > 0.0025 \\ 0.0025 & \alpha_{corr} l_p^{solved} < 0.0025 \\ l_e & \alpha_{corr} l_p^{solved} > l_e \end{cases}$$
(۱۶)

۲-۴- معادلات حاکم بر جریان سیال

از معادلات دوبعدی RANS برای شبیه‌سازی جریان سیال تراکم‌ناپذیر استفاده شده است. معادلات اساسی برای حل جریان سیال به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$
(۱۷)

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} f_{b_i}$$
(۱۸)

که در آن p فشار استاتیک، ν لزجت سیال، u سرعت، ρ چگالی سیال، τ تانسور تنش رینولدز و \vec{f}_b نیروی حجمی اثر عملگر پلاسمایی بر واحد حجم است. همان‌طور که در معادله (۱۸) مشاهده می‌شود، نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی به صورت یک جمله چشمه به معادله اندازه حرکت افزوده شده است.

۲-۵- نحوه حل معادلات جریان سیال و مدل سوزن-هوانگ

برای حل معادلات میدان پتانسیل الکتریکی و توزیع غلظت پلازما بهتر است معادلات و شرایط مرزی آن‌ها به شکل بی‌بعد درآیند. بدین ترتیب می‌توان پس از حل معادلات، پتانسیل الکتریکی و غلظت شارژ را با هر دامنه ولتاژ اعمالی و در هر زمان دلخواه در دامنه محاسباتی به دست آورد.

نحوه بی‌بعدسازی را می‌توان در روابط (۱۹) و (۲۰) مشاهده کرد. با اعمال این بی‌بعدسازی دو رابطه حاکم بر مدل الکتروستاتیک SH به روابط (۲۱) و (۲۲) تبدیل می‌شوند. حل معادلات مدل و همچنین جریان سیال توسط نرم‌افزار تجاری کامسول ۵ انجام شده است که از متد المان محدود برای مدل‌سازی استفاده می‌کند.

$$\phi^* = \phi / \phi^{max} f(t) \quad (19)$$

$$q_c^* = q_c / q_c^{max} f(t) \quad (20)$$

$$\nabla E^* = \nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi^*) = 0 \quad (21)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla q_c^*) = \frac{q_c^*}{\lambda_d^2} \quad (22)$$

۳- نتایج

۳-۱- اعتبارسنجی مدل پدیده‌ای تخمین نیروی پیشران تولیدی و طول گسترش پلازما

به منظور بررسی دقت مدل پدیده‌ای در پیش‌بینی نیروی پیشران تولیدی توسط عملگر پلاسمایی، چندین آزمون آزمایشگاهی انتخاب و جهت اعتبارسنجی به کار گرفته شده است. در بررسی دقت مدل در پیش‌بینی نیروی پیشران تولیدی از نتایج آزمایش توماس و همکارانش [۳۲] استفاده شده است. مشخصات هندسی و عملکردی عملگر به کار گرفته شده در این پژوهش بدین شرح است: ضخامت الکترودها ۴۰ میکرومتر و طول الکتروود درونی ۵/۰۸ سانتی متر. همچنین جنس دی الکتریک و ضخامت آن و همچنین فرکانس اعمالی به عملگر در مدل‌های مختلف در جدول (۱) ارائه شده است.

شکل (۲) مقایسه‌ای را میان نتایج مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی برای عملگرهای معرفی شده در جدول (۱) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این مدل با دقت بالایی نتایجی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌کند. از طرفی این نتایج نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی در عملکرد عملگرهای مختلف با مشخصات هندسی و غیرهندسی مختلف کارا بوده و نتایج مطلوبی را دست می‌دهد. جهت مقایسه دقت مدل در تخمین نیروی پیشران تولیدی، بر روی یک حالت از آزمایش توماس، مقایسه‌ای میان پژوهش حاضر و پژوهش مرجع [۲۴] انجام شده است.

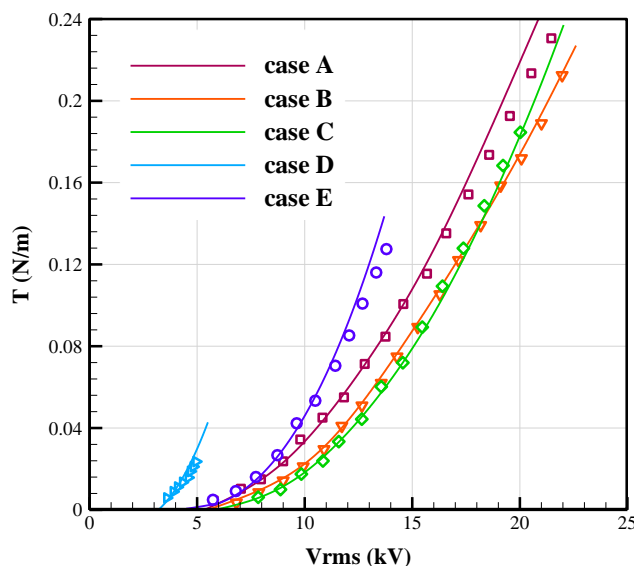
جدول ۱- مشخصات هندسی و عملکردی عملگر مورد استفاده در آزمایش توماس و همکارانش [۳۲]

case	ϵ_{rd}	t_d (mm)	f (kHz)
A -	2.0	3.18	2.1
B -	3.5	6.35	2.3
C -	4.2	6.35	2.3
D -	3.9	0.15	4.4
E -	6.0	3.18	2.3

مشخصات هندسی و عملکردی عملگر پلاسمایی بدین صورت است: ضریب نفوذپذیری نسبی الکتریکی ۳/۹، طول الکتروود درونی ۵/۰۸ سانتی متر، ضخامت الکتروود ۴۰ میکرومتر، ضخامت دی الکتریک ۶/۳۵ میلی متر و فرکانس ۴/۴ کیلوهرتز. نتایج تست‌های آزمایشگاهی نشان داده است که نیروی پیشران تولیدی با توان $\frac{7}{2}$ دامنه ولتاژ اعمالی متناسب است ($T \propto V_{app}^{\frac{7}{2}}$). برای مدل حاضر این تناسب به صورت $T \propto V_{app}^{\frac{7.96}{2}}$ است، در حالی که برای مدل ارائه شده در مرجع [۲۴] تناسب $T \propto V_{app}^{\frac{10.15}{2}}$ برقرار می‌باشد.

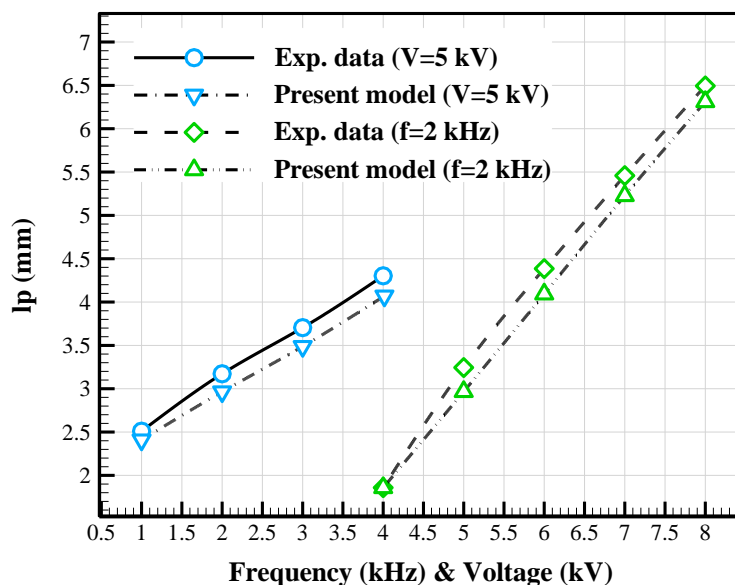
این نتایج دقت بالا و نزدیکی نتایج مدل پیشنهادی حاضر به نتایج آزمایشگاهی را گزارش می‌کند. (رابطه نیروی پیشران تولیدی برای پژوهش مرجع [۲۴]: $T = 1.162e - 7 * V_{app}^{5.096} - 0.00446$ و برای پژوهش حاضر: $T = 3.838e - 7 * V_{app}^{3.98} - 0.00657$ می‌باشد.)

جهت اعتبارسنجی طول گسترش پلاسمای تولیدی توسط معادله حاکم بر آن در مدل پیشنهادی، از مطالعه آزمایشگاهی کوتسونیس و همکارانش [۳۳] استفاده شده است. مشخصات هندسی عملگر پلاسمایی مورد استفاده توسط آنها بدین شرح است: طول الکتروود بیرونی ۱۰ میلیمتر، طول الکتروود درونی ۱۰ میلیمتر، ضخامت الکتروود ۶۰ میکرومتر، ضخامت دی الکتریک ۱۱۰ میکرومتر. همچنین جنس دی الکتریک مورد استفاده کاپتون می‌باشد. پژوهش کوتسونیس و همکارانش [۳۳] در دو فاز مختلف انجام گرفته است. در فاز اول در ولتاژ ثابت ۵ کیلوولت فرکانس از ۱ تا ۴ کیلوهرتز با گام ۱ کیلوهرتز تغییر داده شده و توزیع نیروی حجمی تولیدی به دست آمده است. در فاز دوم در فرکانس ثابت ۲ کیلوهرتز ولتاژ از ۴ تا ۸ کیلوولت با گام ۱ کیلوولت تغییر داده شده و مجدداً توزیع نیروی حجمی تولیدی محاسبه شده است.



شکل ۲- اعتبارسنجی نیروی پیشران تولیدی در مقایسه با تست‌های آزمایشگاهی [۳۲]

خطوط: نتایج مدل حاضر، نودها: نتایج تست‌های آزمایشگاهی



شکل ۳- اعتبارسنجی معادله طول پلازما در مدل پیشنهادی و مقایسه آن با نتایج تجربی [۳۳]

در مطالعه حاضر به روش معکوس مدل سوزن- هوانگ [۱۷] طبق راهکار ارائه شده توسط بوچمال [۲۶] توزیع شارژ بر روی سطح دی‌الکتریک برای هر یک از حالت‌های تست کوتسونیس و همکارانش از توزیع نیروی حجمی به دست آمده و بدین ترتیب طول گسترش پلاسمای تولیدی در کار آزمایشگاهی محاسبه شده و با نتایج رابطه (۱۵) در مدل عددی حاضر مقایسه شده است. همانطور که قابل مشاهده است نتایج مدل پیشنهادی با دقت بسیار خوبی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی گزارش می‌شود.

۳-۲- بررسی دقت مدل ارتقایافته در شبیه‌سازی ساختار لایه مرزی بر روی صفحه تخت

جهت بررسی دقت مدل پیشنهادی در شبیه‌سازی اثر عملگر پلاسمایی در ساختار لایه مرزی جریان سیال، هوای ساکن تحریک شده توسط عملگر پلاسمایی بر روی صفحه تخت انتخاب شده است. این مطالعه توسط توماس و همکارانش [۳۲] به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته است. بررسی هوای ساکن تحریک شده بر روی صفحه تخت به عنوان ساده‌ترین مدل ممکن در بین محققان از اهمیت بالایی برخوردار است. این جریان هم از لحاظ بررسی قدرت جت تولیدی و هم از لحاظ بررسی اثر خالص عملگر پلاسمایی بدون جریان پایه اهمیت فراوان دارد. این امر سبب شده است که بسیاری از مدل‌های عددی با این تست‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شوند. عملگر پلاسمایی مورد استفاده توسط توماس و همکارانش [۳۲] دارای طول الکتروود درونی ۲۰/۳۲ سانتی‌متر، طول الکتروود بیرونی ۱۰/۱۶ سانتی‌متر، ضخامت الکتروود ۰/۰۴ میلی‌متر و ضخامت دی‌الکتریک ۰/۱۵۳ میلی‌متر است. جنس لایه دی‌الکتریک مورد استفاده توسط آن‌ها کاپتون می‌باشد.

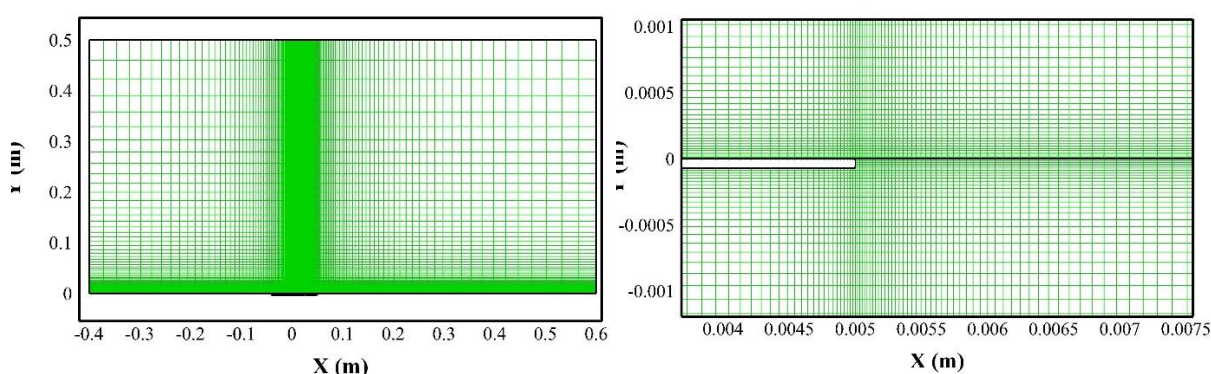
دامنه محاسباتی انتخاب شده برای حل عددی جریان سیال، یک مستطیل به طول ۱ متر و عرض ۰/۵ متر است. در دامنه محاسباتی برای سطح صفحه از شرط مرزی عدم لغزش و برای وجه بالایی از شرط مرزی متقارن استفاده شده است. همچنین به علت ساکن بودن جریان هوا پیش از روشن ساختن عملگر پلاسمایی، در ورودی

جریان (ضلع چپ دامنه حل) شرط مرزی سرعت-صفر لحاظ می‌شود. برای دستیابی به طول بیشتری از جت تولیدی بر روی صفحه تخت محل قرارگیری عملگر متمایل به ورودی جریان نصب شده است.

شکل (۴) شبکه محاسباتی تولیدی برای حل جریان سیال و مدل ارتقایافته را نشان می‌دهد. جهت تولید این شبکه محاسباتی، از شبکه سازمان‌یافته با تراکم بالا در نواحی اطراف عملگر پلاسمایی استفاده شده است. شبکه سازمان‌یافته در محاسبه نواحی دارای گرادیان‌های بالا کیفیت مطلوبی را داراست و به علت سطوح صاف دامنه محاسباتی و شکل عملگر پلاسمایی این شبکه بهترین انتخاب می‌تواند باشد. شکل (۴) شبکه تولیدی را در تمام دامنه محاسباتی و با بزرگنمایی در اطراف الکتروود بیرونی نشان می‌دهد. شبکه در نزدیکی الکتروودهای عملگر کاملاً ریز شده است و ارتفاع کوچکترین سلول در نزدیکی دیواره ۳۰ مرتبه کمتر از طول دمای در نظر گرفته شده است، تا پدیده‌هایی که از مدل‌سازی عملگر و پس از آن مدل‌سازی هیدرودینامیک به دست می‌آید، به خوبی مشاهده شوند.

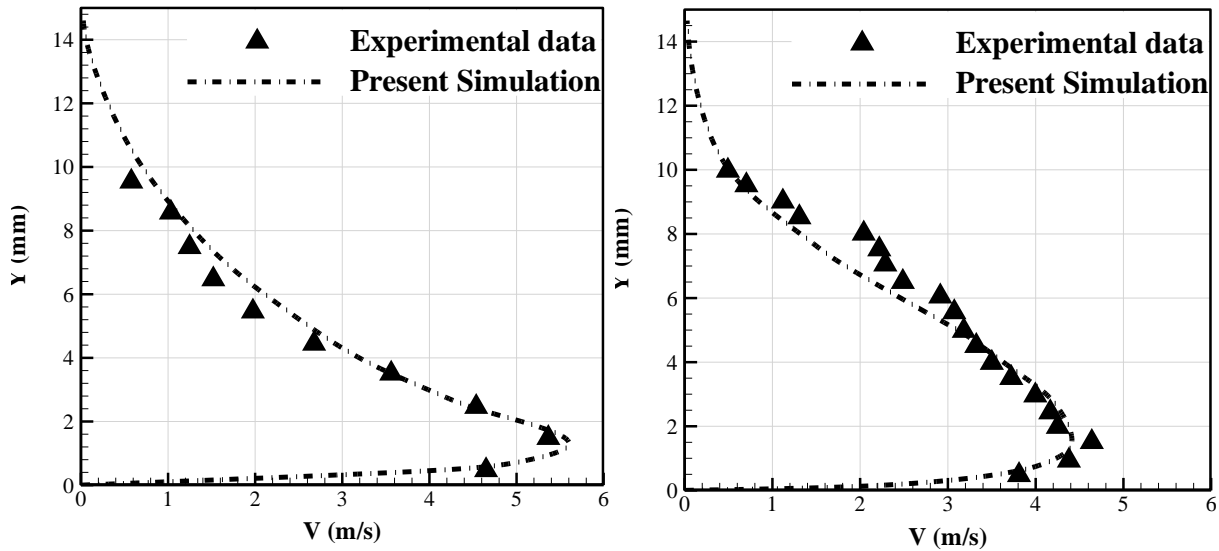
شکل (۵) پروفیل‌های سرعت القایی را در شبیه‌سازی حاضر (مدل ارتقایافته) با داده‌های آزمایشگاهی توماس و همکارانش [۳۲] مقایسه می‌کند. این مقایسه در دو مقطع مختلف در پایین دست لبه فرار الکتروود بیرونی صورت گرفته است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد مدل عددی پیشنهادی در شبیه‌سازی ساختار لایه مرزی در هر دو مقطع مورد بررسی، هم در ارتفاع و هم در ماکزیمم پروفیل سرعت موفق بوده است. درصد خطا در ماکزیمم سرعت القایی در هر دو پروفیل کمتر از ۵ درصد برای شبیه‌سازی حاضر گزارش می‌شود.

شکل (۶) توزیع بردارهای نیروی حجمی تولیدی توسط عملگر پلاسمایی را بر روی صفحه تخت در نزدیکی لبه فرار الکتروود بیرونی نشان می‌دهد. این نیروی حجمی همانطور که در بخش ۲-۱ اشاره شد از رابطه (۳) به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود بردارهای نزدیک به الکتروود بیرونی از اندازه بزرگتری برخوردار هستند، با این وجود با فاصله گرفتن از الکتروود بیرونی جهت مطلوب نیروی حجمی برای ایجاد یک جت دیواره در راستای سطح آیرودینامیکی بیشتر خود را نشان می‌دهد.



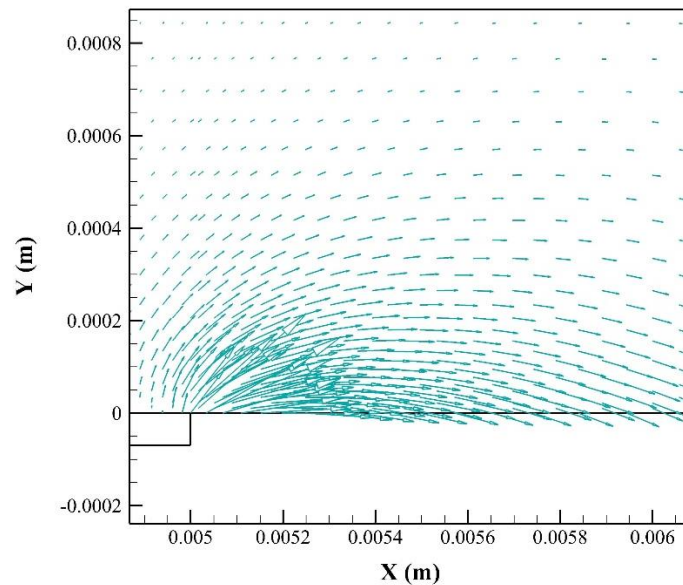
شکل ۴- شبکه محاسباتی تولیدی پیرامون عملگر پلاسمایی در شبیه‌سازی جریان سیال روی صفحه تخت

چپ: شبکه تولیدی در تمام دامنه محاسباتی، راست: شبکه تولیدی در نزدیکی الکتروود بیرونی



شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های لایه مرزی شبیه‌سازی شده توسط مدل ارتقایافته با نتایج آزمایشگاهی [۳۲]

چپ: مقطع ۳/۸ سانتی‌متر، راست: مقطع ۵/۸ سانتی‌متر (پایین تر از لبه فرار الکترو دبیرونی)



شکل ۶- بردارهای نیروی حجمی القایی توسط عملگر پلاسمایی در مدل ارتقایافته

۳-۳- بررسی دقت مدل ارتقایافته در شبیه‌سازی ساختار لایه مرزی بر روی ایرفویل

پس از شبیه‌سازی و بررسی هوای ساکن تحریک شده توسط عملگر پلاسمایی بر روی صفحه تخت، دقت مدل عددی ارتقایافته برای شبیه‌سازی اثر عملگر پلاسمایی در کنترل جریان عبوری از سطح دارای انحنای ایرفویل بررسی می‌شود. برای این منظور از تست‌های آزمایشگاهی ونگ و همکارانش [۳۴] استفاده شده است. ایرفویل مورد استفاده توسط ونگ و همکارانش ایرفویل متقارن ناکا ۰۰۱۵ می‌باشد. طول وتر ایرفویل ۰/۱ متر و سرعت عبوری از آن ۲۰ متر بر ثانیه است. طول الکترو دبیرونی ۴۴۰ میلی‌متر، ضخامت الکترو دبیرونی ۰/۰۵ میلی‌متر و ضخامت دی‌الکتریک ۰/۱ میلی‌متر و از جنس کاپتون گزارش شده است.

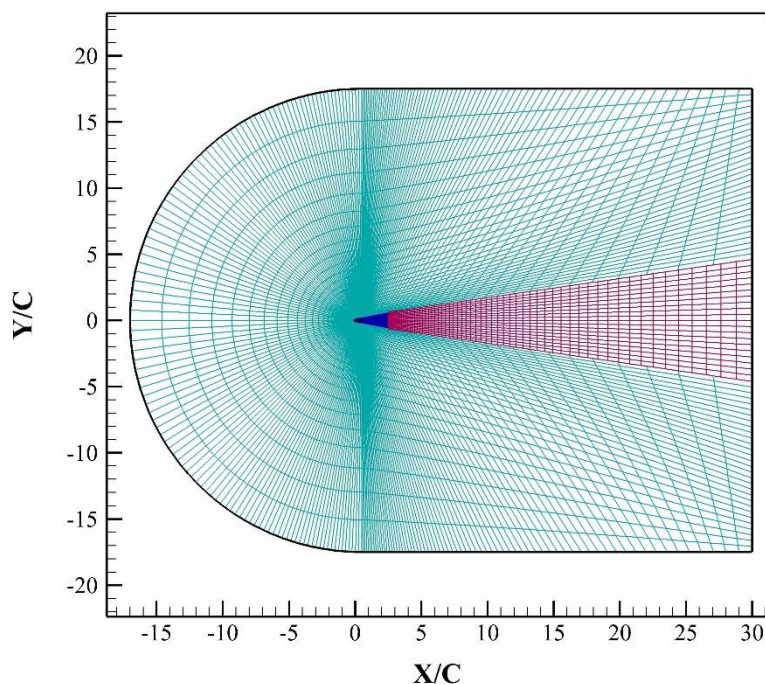
در پژوهش ونگ و همکارانش، درون ایرفویل به عنوان الکتروود درونی با ولتاژ صفر در نقش زمین فرض شده است. عملگر پلاسمایی در لبه حمله ایرفویل نصب و ولتاژ سینوسی به الکتروود بیرونی در فرکانسهای مختلفی اعمال می‌شود. بی تردید کیفیت شبکه تولیدی تأثیر مهمی بر نتایج حل عددی خواهد داشت. اما کیفیت شبکه تابعی از عوامل متعددی از جمله فیزیک مسئله و پدیده‌های مربوط به آن، الزاماتی که الگوریتم حل عددی طلب می‌کند، توان سخت افزاری برای انجام محاسبات و سایر موارد می‌باشد. از این رو باید با توجه به این مسائل، شبکه‌ای مناسب ایجاد کرد که اولاً متناسب با توان محاسباتی و سخت افزاری در دسترس باشد و نیز قابلیت هم‌خوانی با الزامات حل عددی را نیز داشته باشد.

نخستین نکته در مورد فیزیک مسئله مورد بررسی در این پژوهش، این است که ایرفویل در معرض جریان هوایی با سرعت کم است. به طوری که سرعت جریان آزاد عبوری از ایرفویل در محدوده جریان‌های تراکم‌ناپذیر می‌باشد. از طرفی تشکیل حباب‌های جدایش و شکل‌گیری جریان آشفته نیز از جمله اتفاقاتی است که بر روی سطح مکشی ایرفویل روی می‌دهد که باید شبکه به شکلی سلول‌بندی شود که این پدیده‌ها مشاهده شوند. برای ایرفویل دارای عملگر نیز باید تراکم شبکه در نزدیکی عملگر و محل تشکیل پلاσμα بر روی سطح دی‌الکتریک برای دستیابی به پدیده‌های روی‌دهنده در این نواحی به اندازه کافی ریز باشد. در عین حال باید توجه داشت که شبکه تولیدی نباید هزینه محاسباتی بالایی را ایجاد کند.

با توجه به تمام ملاحظات ذکر شده، جهت تولید شبکه پیرامون ایرفویل از یک شبکه نوع C مطابق شکل (۷) استفاده شده است. با استفاده از تکنیک‌های تولید شبکه، تعداد سلول‌های حل را در بخش‌هایی از میدان که کیفیت شبکه در آن چندان بر روند حل و نتایج مورد نظر تأثیرگذار نیست، می‌توان کاهش داد. از این رو میدان جریان به چند بخش مجزا تقسیم شده و سپس به صورت یکپارچه به یکدیگر متصل شده‌اند. شبکه چندبلوکی با شرط مرزی interface میان بلوک‌ها کمک می‌کند تا در نقاط دور از گرادیان‌های شدید که نیازی به شبکه‌ای با تراکم بالا نیست، شبکه درشت‌تر شود و در نتیجه هزینه محاسباتی تا حد بالایی کاهش یابد.

در شکل (۷) رنگ سبز و قرمز دو ناحیه دارای گرادیانهای کم هستند که با بلوکهای مجزایی جدا شده تا تراکم شبکه پایین‌تری در آنها ایجاد شود. این در حالی است که بلوک آبی رنگ به علت قرارگیری در نزدیکی ایرفویل و نزدیکی به ناحیه گرادیان‌های شدید از تراکم بالایی برخوردار است. شبکه تولیدی پس از بررسی استقلال حل عددی از شبکه تولیدی و دامنه حل، در مجموع با حدود ۳۸ هزار سلول تولید و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به شکل (۷)، دامنه انتخابی برای حل به اندازه ۳۰ برابر طول وتر از لبه فرار و در پشت ایرفویل گسترش یافته است. این دامنه به اندازه ۱۷ برابر طول وتر بالا، پایین و جلوی ایرفویل را نیز پوشش می‌دهد. بلوک مرکزی این شبکه که در بردارنده ایرفویل است، به اندازه ۰/۴ برابر طول وتر از لبه حمله ایرفویل و به اندازه ۳ برابر طول وتر از لبه فرار گسترش پیدا کرده است.

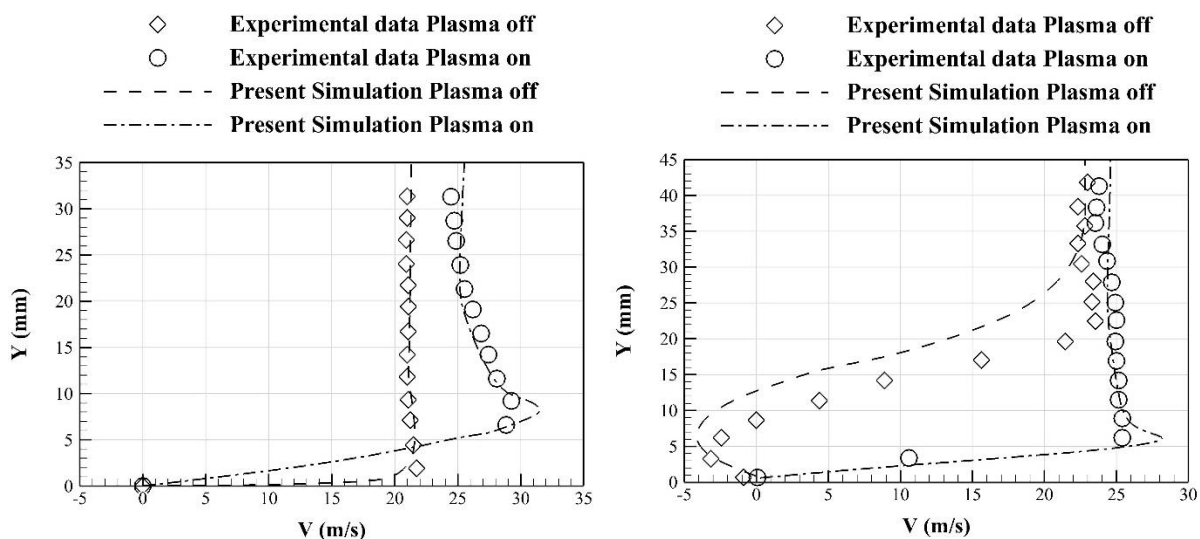


شکل ۷- دامنه حل و شبکه تولیدی به روش چندبلاکی پیرامون ایرفویل

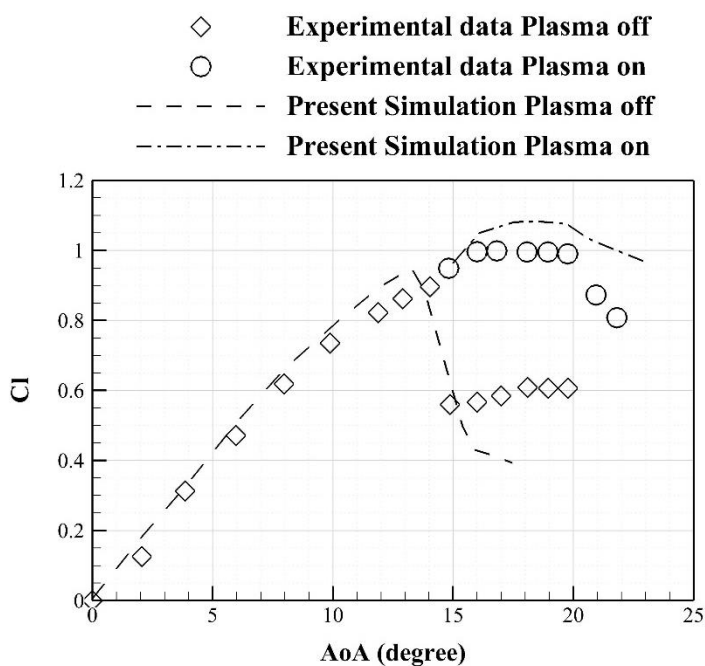
در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی حباب‌های جدایش و آشفتگی‌های محلی صورت گرفته بر روی ایرفویل از مدل آشفتگی چهار معادله‌ای *transition SST* در نرم‌افزار آنسیس فلونت ۱۴/۵ استفاده شده است. جهت بررسی همگرایی حل جریان، علاوه بر بررسی خطای باقیمانده‌های حاصل از حل معادلات جریان، که عموماً خطای باقیمانده‌ها برای حل معادله پیوستگی تا مرتبه 10^{-13} کاهش می‌یابد، ضرایب آیرودینامیکی نیز بررسی شده و تا همگرایی کامل آن‌ها حل ادامه یافته است. همچنین اختلاف فلاکس جرمی عبوری در ورودی و خروجی دامنه حل نیز جهت همگرایی بررسی شده است.

شکل (۸) پروفیل‌های سرعت را در دو مقطع ۱۰ و ۴۰ درصد طول وتر از لبه حمله در راستای عمود بر ایرفویل نشان می‌دهد. این دو تصویر مقایسه شبیه‌سازی عددی انجام شده در کار حاضر را با نتایج تست آزمایشگاهی ونگ و همکارانش [۳۴] در دو حالت عملگر پلاسمایی روشن و خاموش نشان می‌دهد. دقت مدل ارتقایافته در شبیه‌سازی ساختار جریان سیال در لایه مرزی با و بدون عملگر پلاسمایی در این شکل قابل مشاهده است. در حالت با عملگر پلاسمایی نقطه ماکزیمم سرعت نسبت به نتایج تست‌های آزمایشگاهی مقدار بیشتری را نشان می‌دهد که قابل چشم‌پوشی است. شکل (۸) برای زاویه حمله ۱۶ درجه رسم شده است و ولتاژ اعمالی به عملگر پلاسمایی ۲/۴ کیلوولت در فرکانس ۳ کیلوهرتز می‌باشد.

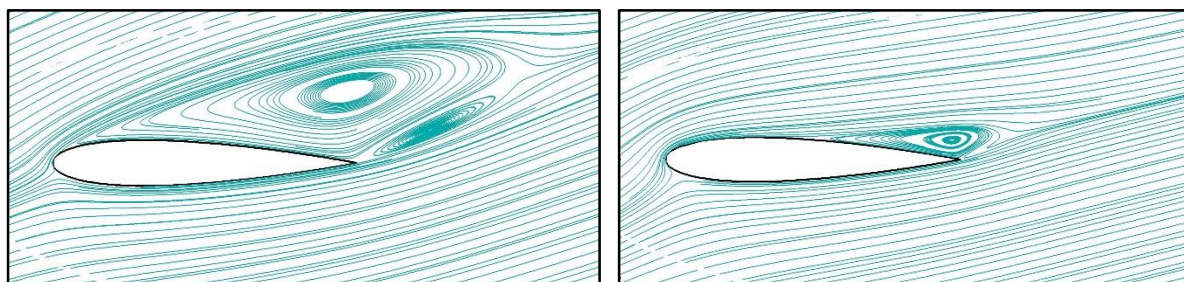
مقایسه‌ای میان نتایج شبیه‌سازی حاضر و نتایج آزمایشگاهی ونگ و همکارانش [۳۴] در توزیع ضریب برآ بر حسب زاویه حمله در شکل (۹) ارائه شده است. ولتاژ اعمالی به عملگر پلاسمایی ۴ کیلوولت در فرکانس ۳ کیلوهرتز است. ضرایب برآی تولیدی از شبیه‌سازی حاضر در دو حالت با و بدون عملگر پلاسمایی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی می‌باشد و درصد خطای آن در ابعاد شبیه‌سازی‌های مهندسی قابل قبول است.



شکل ۸- مقایسه پروفیل‌های سرعت در دو مقطع بر روی ایرفویل با نتایج آزمایشگاهی [۳۴] با و بدون عملگر پلاسمایی
چپ: مقطع ۱۰ درصد، راست: مقطع ۴۰ درصد (طول وتر از لبه حمله)



شکل ۹- مقایسه ضریب برآ بر حسب زاویه حمله با و بدون عملگر پلاسمایی با نتایج آزمایشگاهی [۳۴]



شکل ۱۰- خطوط جریان بر روی ایرفویل با و بدون عملگر پلاسمایی در زاویه حمله ۱۷ درجه

آنچه در این شکل قابل توجه است، رشد عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل پس از قرار گرفتن در واماندگی توسط عملگر پلاسمایی است که توانایی عملگر پلاسمایی را در شرایط واماندگی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، با استفاده از عملگر پلاسمایی، ضریب برآ در شرایط واماندگی در حدود ۳۰ درصد ارتقا داشته است. تأخیر در وقوع واماندگی از زاویه حمله ۱۳ درجه به ۲۰ درجه رسیده است که رشدی در حدود ۵۰ درصد را نشان می‌دهد. در همین راستا شکل (۱۰) توزیع خطوط جریان را برای زاویه حمله ۱۷ درجه با و بدون عملگر پلاسمایی در شبیه‌سازی حاضر ترسیم می‌کند. در زاویه حمله ۱۷ درجه ایرفویل کاملاً در شرایط واماندگی و ناکارایی آیرودینامیکی قرار گرفته است. استفاده از عملگر پلاسمایی با کاهش حباب جدایش جریان امکان استفاده از ایرفویل را در این زاویه حمله بحرانی فراهم آورده و موجب افزایش برآی تولیدی ایرفویل شده است.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از کارآمدترین متدهای کنترل جریان سیال، عملگرهای پلاسمایی هستند که با توجه به ویژگی‌های بارز خود توجه بسیاری از پژوهشگران را در طول دو دهه گذشته به خود جلب کرده‌اند. به علت بالا بودن هزینه‌های حاصل از تست‌های آزمایشگاهی همواره پژوهشگران برای ارتقای شبیه‌سازی‌های عددی این پدیده و همچنین اثر آن در اندرکنش با جریان سیال تلاش‌های بسیاری نموده‌اند. یکی از این مدل‌ها که به مدل‌سازی اثر عملگر پلاسمایی بر جریان سیال می‌پردازد مدل سوزن-هوانگ [۱۷، ۱۸] است. با توجه به اینکه مدل اولیه ارائه شده توسط سوزن و هوانگ، دارای نواقص و محدودیت‌هایی است و امکان استفاده از آن برای هندسه‌های مختلف عملگر پلاسمایی و شرایط مختلف کارکردی عملگر وجود ندارد؛ در طول دهه گذشته در کارهای پژوهشی مختلفی سعی شده است تا این محدودیت‌ها از بین رفته و تطابق بهتری میان این مدل و نتایج آزمایشگاهی برقرار شود [۲۳-۲۷].

در پژوهش حاضر نیز با توجه به تمام پژوهش‌های صورت گرفته بر روی مدل سوزن-هوانگ، با ارائه یک شرط مرزی جدید به جای توزیع گوسی برای توزیع شارژ بر روی سطح دی‌الکتریک، دقت مدل سوزن-هوانگ در شبیه‌سازی غلظت شارژ و نیروی حجمی تولیدی و در نتیجه در شبیه‌سازی ساختار لایه مرزی افزایش پیدا کرده است. این شرط مرزی ارتباطی را میان دو معادله بیضوی مستقل در مدل اولیه سوزن-هوانگ برقرار می‌کند. مطابقت نتایج حاصل از مدل ارتقایافته با نتایج تست‌های آزمایشگاهی بر روی سطح دارای انحنای ایرفویل و صفحه تخت، اثر شرط مرزی بهبودیافته را در دقت بالای مدل حاضر نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] Roth, J. R., "Electrohydrodynamically Induced Airflow in a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma", 25th Anniversary Conference on Plasma Science – IEEE Conference Record – Abstract, pp. 291-291, (1998).
- [2] Kogelschatz, U., Eliasson, B., and Egli, W., "Dielectric-barrier Discharges, Principle and Applications", Journal de Physique IV, Vol. 7, No. C4, pp. 47-66, (1997).

- [3] Van Rosendale, J. R., Malik, M. R., and Hussaini, M. Y., "Ion-wind Effects on Poiseuille and Blasius Flow", *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 8, pp. 961-968, (1988).
- [4] Enloe, C. L., McLaughlin, T., Font, G. I., and Baughn, J. W., "Parameterization of Temporal Structure in the Single-dielectric-barrier Aerodynamic Plasma Actuator", *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 6, pp. 1127-1127 (2006).
- [5] Roth, J. R., Sherman, D. M., and Wilkinson, S. P., "Boundary Layer Flow Control with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma", 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA, pp. 328-356, (Jan. 1998).
- [6] Samimy, M., Kim, J-H., Kastner, J., Adamovich, I., and Utkin, Y., "Active Control of High-Speed and High-reynolds-Number J using Plasma Actuators", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 578, pp. 305-330, (2007).
- [7] Yoon, J-S., and Han, J-H., "One-equation Modeling and Validation of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Thrust", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 47, No. 40, pp. 405202-405202, (2014).
- [8] Nelson, R. C., Corke, T. C., Othman, H., Patel, M. P., Vasudevan, S., and Ng, T., "A Smart Wind Turbine Blade using Distributed Plasma Actuators for Improved Performance", 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, (Jan. 2008).
- [9] Versailles, Ph., Ghosh, Sh., Vo, H. D., and Masson, Ch., "Preliminary Assessment of Wind Turbine Blade Lift Control Via Plasma Actuation", *Wind Engineering*, Vol. 35, No. 3, pp. 339-356, (2011).
- [10] Thomas, F. O., Kozlov, A., and Corke, T. C., "Plasma Actuators for Cylinder Flow Control and Noise Reduction", *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 8, pp. 1921-1921, (2008).
- [11] Huang, J., Corke, T. C., and Thomas, F. O., "Plasma Actuators for Separation Control of Low-pressure Turbine Blades", *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 1, pp. 51-57, (2006).
- [12] Boesch, G., Vo, H. D., Savard, B., Wanko-tchatchouang, C., and Mureithi, N. W., "Flight Control using Wing-tip Plasma Actuation", *Journal of Aircraft*, Vol. 47, No. 6, pp. 1836-1836, (2010).
- [13] Jukes, T. N., "Turbulent Drag Reduction using Surface Plasma", PhD Diss., Mechanical Engineering Department, University of Nottingham, Nottingham, UK, (Jan. 2007).
- [14] Post, M. L., and Corke, T. C., "Separation Control using Plasma Actuators Stationary and Oscillating Airfoils", *AIAA Paper 0841*, (2004).
- [15] Jacob, J. D., Ramakumar, K., Anhony, R., and Rivir, R. B., "Control of Laminar and Turbulent Shear Flows using Plasma Actuators", 4th International Symposium on Turbulence and Shear-flow Phenomena, Williamsburg, USA, (Jun. 2005).
- [16] Roth, J. R., and Dai, X., "Optimization of the Aerodynamic Plasma Actuator as an Electrohydrodynamic (EHD) Electrical Device", 44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, (Jan. 2006).

- [17] Suzen, Y. B., Huang, P. G., Jacob, J. D., and Ashpis, D. E., "Numerical Simulation of Plasma Based Flow Control Applications", AIAA Paper 4633, (2005).
- [18] Suzen, Y. B., and Huang, P. G., "Simulation of Flow Separation Control using Plasma Actuators", AIAA Paper 877, (2006).
- [19] Orlove, D. M., Corke, T. C., and Patel, M., "Electric Circuit Model for Aerodynamic Plasma Actuator", AIAA Paper 1206, (2006).
- [20] Jayaraman, B., and Shyy, W., "Modelling of Dielectric Barrier Discharge-induced Fluid Dynamics and Heat Transfer", *Progress in Aerospace Science*, Vol. 44, No. 3, pp. 139-191, (2008).
- [21] Hall, K. D., Jumper, E. J., and Corke, T. C., "Potential Flow Model of a Plasma Actuator as a Lift Enhancement Device", 43rd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, (Jan. 2005).
- [22] Thomson, R. J., and Moeller, T. M., "Numerical Investigations of Plasma Actuator Lorentz Body Forces", AIAA Paper 1032, (2012).
- [23] Suzen, Y. B., Huang, P. G., and Ashpis, D. E., "Numerical Simulation of Flow Separation Control in Low-pressure Turbines using Plasma Actuators", AIAA Paper 937, (2007).
- [24] Abdollahzadeh, M., Pascoa, J. C., and Oliveira, P. J., "Modified Split-potential Model for Modeling the Effect of DBD Plasma Actuators in High Altitude Flow Control", *Current Applied Physics*, Vol. 14, No. 8, pp. 1160-1170, (2014).
- [25] Ibrahim, I. H., and Skote, M., "Boundary Condition Modification of the Suzen-Huang Plasma Actuator Model", *International Journal of Flow Control*", Vol. 3, No. 2+3, pp. 111-131, (2011).
- [26] Bouchmal, A., "Modeling of Dielectric-barrier Discharge Actuator", Master of Science Thesis, Delft University of Technology, (2011).
- [27] Mazaheri, K., Omidi, J., and Kiani, K. C., "Simulation of DBD Plasma Actuator Effect on Aerodynamic Performance Improvement using a Modified Phenomenological Model", *Computers & Fluids*, Vol. 140, pp. 371-384, (2016).
- [28] Omidi, J., Mazaheri, K., and Kiani, K. C., "Electrostatic Simulation of DBD Plasma Actuator for Low-speed Flow Separation Control", 23th Annual International Conference on Mechanical Engineering (ISME), Tehran, Iran, (2015).
- [29] Omidi, J., and Mazaheri, K., "Numerical Simulation of von-Karman Vortex Shedding Control using of Plasma Actuator", 16th Fluid Dynamics Conference, Kermanshah, Iran, (2015).
- [30] Omidi, J., "Numerical Simulation of DBD Plasma Actuator and Optimization for Separation Control", Master of Science thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, (2015).

- [31] Cristofolini, A., Borghi, C. A., and Neretti, G., "Charge Distribution on the Surface of a Dielectric Barrier Discharge Actuator for the Fluid-dynamic Control", Journal of Applied Physics Vol. 113, No. 14, pp. 143307-143307, (2013).
- [32] Thomas, F. O., Corke, T. C., Iqbal, M., Kozlov, A., and Schatzman, D., "Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Aerodynamic Flow Control", AIAA Journal, Vol. 47, No. 9, pp. 2169-2169, (2009).
- [33] Kotsonis, M., Ghaemi, S., Veldhuis, L., and Scarano, F., "Measurement of the Body Force Field of Plasma Actuators", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 44, No. 4, pp. 045204-045204, (2010).
- [34] Wang, X. N., Wang, W. B., Huang, Y., Huang, Z. B., and Sheng, Z. H., "Airfoil Flow Control using DBD Plasma Actuators", Fluid-structure-sound Interactions and Control, pp. 141-147, (2014).

فهرست نمادهای انگلیسی

C	ظرفیت خازن، فاراد
E	میدان الکتریکی، نیوتون بر کولن
f_b	نیروی حجمی تولیدی توسط عملگر پلاسمایی، نیوتون
f	فرکانس، هرتز
G	تابع توزیع گوسین
h_p	ارتفاع پلاسمای تولیدی، متر
l_e	طول الکتروود درونی، متر
l_p	طول گسترش پلاسمای تولیدی، متر
P	فشار استاتیکی، پاسکال
q_c	شارژ الکتریکی، کولن بر مترمکعب
T	دما، کلوین
t_e	ضخامت الکتروود، متر
t_d	ضخامت دی الکتریک، متر
u_j	سرعت، متر بر ثانیه
V_{app}	ولتاژ اعمالی، ولت
V_{bd}	ولتاژ شکست، ولت

نمادهای یونانی

ϵ_0	نفوذپذیری الکتریکی خلاء، $8.854 \cdot 10^{-12}$ کولن به توان دو بر نیوتون متر مربع
ϵ_r	نفوذپذیری الکتریکی نسبی
λ_d	طول دبابی، متر
ϑ	ویسکوزیته سیال، مترمربع بر ثانیه
ϑ_T	ویسکوزیته آشفتگی، متر مربع بر ثانیه
ρ	چگالی، کیلوگرم بر مترمکعب
ϕ	پتانسیل الکتریکی، ولت

Abstract

Dielectric Barrier Discharge (DBD) plasma actuators are one of the most efficient and promising technique for active flow control. DBD plasma actuators are all-electric devices without need of pneumatic, hydraulic or moving parts. They are light and fast with low power consumption. All these features have attracted researchers to use these actuators in a variety of cases, such as turbulence flow control, laminar to turbulent transition suppression, separation control, drag reduction and mitigation of noise pollution. One of the models for simulation of plasma actuator effect on fluid flow is the electrostatic Suzen-Huang (S-H) model.

This model adds the actuator effect as source terms to the Navier-Stokes equations by solving two elliptic equations of the electrical potential and the charge density. In this study, a relationship between the independent electrical potential and charge density equations has been made in the form of a boundary condition for charge distribution on the dielectric surface. The results show that the boundary layer structures on airfoil surface and flat plate is predicted with much higher accuracy by utilizing the modified model.