

# ارتقای الگوی عملگر پلاسما در شبیه‌سازی فیزیک جریان جت القایی

عباس ابراهیمی\* (استادیار)

جواد امیدی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۳۹۷)  
دوری ۳-۳، شماره ۲، ص. ۱۷-۱۱

کنترل جریان سیال عبوری از سطوح آیرودینامیکی به کمک عملگرهای پلاسما دی‌بی‌دی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله چالش‌های پژوهش در این زمینه، ضعف الگوهای عددی است که بتوانند فیزیک این پدیده را به‌طور دقیق و با هزینه محاسباتی کم شبیه‌سازی کنند. یکی از الگوهای سریع برای شبیه‌سازی اندرکنش اثر عملگر پلاسمایی و جریان سیال، الگوی الکترواستاتیک سوزن و هوانگ است که با حل معادلات میدان پتانسیل الکتریکی و غلظت شارژ، اثر عملگر را به صورت نیروهای حجمی (جمله‌های چشمه) به معادلات مومنتوم جریان اضافه می‌کند. در این پژوهش، ارتقایی بر این الگوی الکترواستاتیک پیشنهاد شده که در آن ارتباطی میان دو معادله‌ی مستقل پتانسیل الکتریکی و غلظت شارژ توسط یک شرط مرزی برای توزیع شارژ، برقرار می‌شود. براساس الگوی پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی جت القایی در جریان سیال روی صفحه تخت با دقت بالایی با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد.

واژگان کلیدی: الگوی الکترواستاتیک ارتقاء یافته، شبیه‌سازی عددی، عملگر پلاسمای دی‌بی‌دی، کنترل جریان سیال.

ebrahimi\_a@sharif.ir  
jomidi@alum.sharif.ir

## ۱. مقدمه

کنترل جریان هوای عبوری از روی سطوح آیرودینامیکی در مجاورت دیواره‌ها (لایه‌ی مرزی جریان) نقش مهمی در افزایش عملکرد وسایل پرنده دارد. عملگر پلاسما، وسیله‌ی بی‌است که می‌تواند جتی از جریان سیال در مجاورت دیواره تولید کند و جزو روش‌های کنترل فعال جریان محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از عملگرهای پلاسمایی به عنوان روشی جدید و کارآمد برای بهبود راندمان وسایل آیرودینامیکی، مورد توجه پژوهشگران در کاربردهای مختلف بوده است. آخرین پیشرفت‌ها و دستاوردها در زمینه کنترل جریان سیال با عملگرهای پلاسما و ویژگی‌های آنها توسط محققان<sup>[۱]</sup> به‌طور جامع مرور شده است. این عملگرها با شکل‌ها و انواع مختلفی طراحی و استفاده شده‌اند<sup>[۲]</sup> که در این میان، عملگرهای پلاسمای دی‌بی‌دی<sup>۱</sup> به عنوان یکی از شاخص‌ترین آنها می‌باشند. دی‌بی‌دی‌ها دارای ویژگی‌هایی از جمله، سبکی، نصب آسان، هزینه‌ی کم و توان مصرفی پایین هستند<sup>[۳]</sup> که کاربردهای مختلف نظیر کنترل جریان، کنترل نوین، کاهش پسا و غیره را توجیه می‌کند.<sup>[۴-۶]</sup>

عملگر پلاسمای دی‌بی‌دی از دو الکتروود تشکیل شده که توسط یک لایه‌ی دی‌الکتریک از یکدیگر جدا شده‌اند (شکل ۱). الکتروود بیرونی در معرض جریان

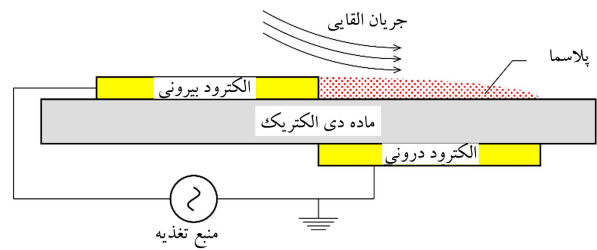
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۵/۵، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۲/۱۸، پذیرش ۱۳۹۶/۱/۲۰.

DOI: 10.24200/J40.2018.6409

هواست و منبع تأمین ولتاژ به آن وصل می‌شود. الکتروود درونی در لایه‌ی دی‌الکتریک پنهان است و با ولتاژ صفر نقش زمین را ایفا می‌کند. در ولتاژهای به اندازه کافی بزرگ (بالتر از ولتاژ بحرانی)، عملگر پلاسما موجب یونیزه شدن مولکول‌های هوا می‌شود و ذرات باردار حاصله در مجاورت میدان الکتریکی حاکم، به ذرات خنثای هوا مومنتوم منتقل می‌کنند و جریان هوا از سمت الکتروود بیرونی به سمت الکتروود درونی کشیده می‌شود، که این اثر به شکل یک جت القایی خود را نشان می‌دهد. تحلیل و شبیه‌سازی جت القایی یا باد یونی ناشی از پلاسما به علت ترکیب پدیده‌ی یونیزاسیون و اندرکنش آن با جریان سیال، بسیار پیچیده و دشوار است. ترکیب معادلات ماکسول و ناویر-استوکس برای حل دقیق این پدیده بسیار ضروری است؛ این ترکیب غیرخطی به دلیل مقیاس‌های زمانی بسیار متفاوت، حلی دشوار و پرهزینه دارد. در این راستا همواره پژوهش‌هایی در طول ده سال گذشته انجام شده و دسته‌ی از الگوهای عددی برای شبیه‌سازی اثر عملگر پلاسمایی ارائه شده است. در این روش‌ها، معادلات ماکسول با اعمال فرضیاتی، مستقل از معادلات جریان سیال حل می‌شود و نیروی حجمی تولید شده ناشی از جت تولیدی پلاسما محاسبه خواهد شد. این نیروی حجمی به عنوان اثر عملگر پلاسما و به صورت نیروی حجمی به معادلات ناویر-استوکس (مومنتوم) اضافه می‌شود.

الگوهای روث،<sup>[۷]</sup> الکترواستاتیک سوزن و هوانگ (S-H)،<sup>[۸]</sup> اجزای مداری،<sup>[۹]</sup> توزیع نیروی خطی شده،<sup>[۱۰]</sup> جریان پتانسیل<sup>[۱۱]</sup> و حل کامل معادلات ماکسول



شکل ۱. شماتیک عملگر پلاسما DBD.

می شود، فرایند یونیزاسیون ناپایا به وقوع می پیوندد که در مقیاس های زمانی میلی ثانیه، جریان هوا از آن اثر می پذیرد. حضور ذرات باردار ناشی از این فرایند در میدان الکتریکی حاکم، در مقیاس زمانی اثرپذیری جریان، یک نیروی حجمی بر جریان سیال خارجی اعمال می کند. با صرف نظر کردن از اثر نیروهای مغناطیسی، نیروی حجمی القا شده توسط عملگر پلاسما به کمک معادله ی لورنتز (رابطه ی ۲) قابل محاسبه است:

$$\vec{f}_b = q_c \vec{E} = q_c (-\nabla \phi) \quad (2)$$

که در آن  $q_c$  غلظت پلاسما برحسب کولومب بر مترمکعب،  $\vec{E}$  بردار میدان الکتریکی و  $\phi$  پتانسیل الکتریکی است.

سوزن و هوانگ<sup>[۹]</sup> با اعمال فرض های ساده کننده در مجموعه معادلات ماکسول، دو معادله ی ۳ و ۴ را برای توزیع میدان پتانسیل الکتریکی و توزیع غلظت شارژ ارائه کردند.

$$\nabla E = \nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla q_c) = \frac{q_c}{\lambda_d} \quad (4)$$

که در آن،  $\lambda_d$  طول دبی و  $\epsilon_r$  نفوذپذیری الکتریکی نسبی است. معادله ی پتانسیل الکتریکی (رابطه ی ۳) هم در قسمت دی الکتریک و هم در قسمت سیال حل می شود. شرایط مرزی برای حل این معادله به گونه یی است که روی مرز بیرونی  $(\partial \phi / \partial n_i = 0)$ ، سطح الکتروود خارجی  $(\phi = \phi(t))$  و سطح الکتروود داخلی  $(\phi = 0)$  برقرارند.  $n_i$  بردار یکه ی عمودی سطح است و  $\phi(t) = \phi^{max} f(t)$  عبارت است از تغییرات تناوبی ولتاژ اعمالی.  $f(t)$  شکل موج و  $\phi^{max}$  به بیشترین دامنه ی ولتاژ اعمالی مربوط می شود. همچنین معادله ی غلظت پلاسما (رابطه ی ۴) تنها در قسمت سیال حل می شود و شرایط مرزی برای حل این معادله به گونه یی است که روی مرز بیرونی  $(q_c = 0)$ ، روی سطحی از دی الکتریک که الکتروود داخلی را می پوشاند  $(q_c = q_c^{max} G(x) f(t))$  و برای بقیه ی سطوح دی الکتریک و الکتروود خارجی  $(\partial q_c / \partial n_i = 0)$  برقرارند.  $q_c^{max}$  به بیشترین غلظت شارژ ولتاژ اعمالی مربوط می شود.

بنابر پیشنهاد سوزن و هوانگ<sup>[۹]</sup> می توان توزیع مکانی غلظت شارژ را با توجه به نتایج تجربی با یک توزیع گوسی  $G(x)$  تقریب زد که از ضلع مشترک دو الکتروود تا قسمتی از سطح دی الکتریک که الکتروود درونی را پوشانده پیشروی می کند. این توزیع گوسی مطابق رابطه ی ۵ تعریف می شود:

$$G(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

که در آن  $x$  موقعیت محوری هر نقطه از سطح دی الکتریک؛  $x_0$  موقعیت بیشینه ی مقدار توزیع است و  $\sigma$  به عنوان پارامتر تنظیم کننده توزیع گوسی شناخته می شود. بنابراین با حل دو معادله ی بیضوی مستقل و مجزا از معادلات جریان سیال برای توزیع میدان پتانسیل الکتریکی و غلظت شارژ، نیروی حجمی تولیدی محاسبه می شود.

#### ۴. الگوی ارتقاء یافته ی S-H

در راستای ارتقای الگوی عددی S-H، تلاش هایی برای رفع ضرورت کالیبره کردن پارامترهای این الگو با استفاده از نتایج تجربی انجام شده است.<sup>[۱۷-۱۵]</sup> یکی از نواقص

بدون در نظر گرفتن جمله های مغناطیسی<sup>[۱۳]</sup> از جمله این الگوها برای محاسبه ی نیروی حجمی ناشی از عملگر پلاسماست.

الگوی S-H یکی از فیزیکی ترین تقریب های شبیه سازی اثر عملگر پلاسماست<sup>[۱۳]</sup> که با فرض زمان کافی برای تولید پیوسته شار ه ی پلاسما و شبه پایا در نظر گرفتن تولید آن، ارائه شده است. پارامترهای این الگو از کالیبراسیون با استفاده از نتایج تجربی به دست می آید و یک ایراد اساسی آن، مستقل بودن غلظت پلاسما تولید شده از ولتاژ اعمالی بر الکتروودهاست. به عبارتی این الگو برای عملگری با مشخصات هندسی و عملکردی خاص کارآیی دارد اما برای شبیه سازی شکل های دیگر عملگر و ولتاژهای اعمالی مختلف، ناقص است. ایراد دیگر این الگو، بی اثر بودن تمام پارامترهای دیگر در هندسه ی عملگر در حل معادله ی توزیع پتانسیل و تولید شارژ است. همچنین اثر فرکانس ولتاژ اعمالی و جنس دی الکتریک نیز در آن دیده نمی شود.

در این مقاله شرط مرزی جدیدی برای الگوی S-H، به جای توزیع گوسی که در پژوهش های قبلی استفاده شده، پیشنهاد شده است که دقت بالاتری را در شبیه سازی اثر عملگر ارائه می دهد. نویسندگان در کار قبلی خود<sup>[۱۴]</sup> با استفاده از این الگوی ارتقاء یافته، اثر ولتاژ و فرکانس اعمالی به عملگر پلاسما را روی یک ایرفویل توربین باد مورد مطالعه قرار داده اند.

#### ۲. معادلات حاکم بر جریان

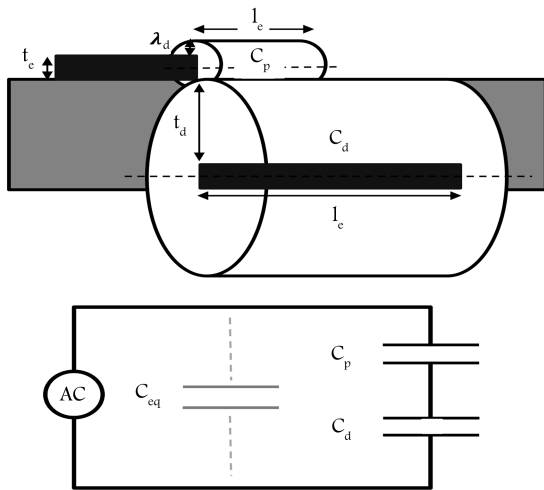
در این مقاله از معادلات دو بعدی رینولد - میانگین ناوییر-استوکس<sup>۵</sup> (RANS) برای شبیه سازی جریان سیال تراکم ناپذیر استفاده شده است. معادلات بقای جرم و اندازه حرکت برای حل جریان سیال عبارت اند از:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} + f_{bi} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن،  $p$  فشار استاتیک،  $u_i$  میدان سرعت،  $\rho$  چگالی سیال و  $\overline{u_i' u_j'}$  به تنش های رینولدز معروف اند. این جملات مجهول، برای بسته شدن مجموعه معادلات، با روش آشفتگی  $SST-k-\omega$  مدل سازی شده اند.  $f_{bi}$  نیروی حجمی ناشی از اثر عملگر پلاسما بر واحد حجم است که در این مقاله با استفاده از الگوی S-H ارتقاء یافته محاسبه می شود.

#### ۳. معادلات الگوی S-H

هنگامی که یک ولتاژ بالا میان دو الکتروود جدا شده توسط دی الکتریک اعمال



شکل ۲. عملگر پلاسمای DBD به همراه مدار الکتریکی معادل آن.<sup>[۱۵]</sup>

در روابط ۷ و ۸ طول دبابی با توجه به پژوهش انجام شده توسط بوچمال<sup>[۲]</sup> از رابطه ۹ محاسبه و اعمال می‌شود:

$$\lambda_d = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3} \times 10^{-2} V_{app} - \frac{1}{42} \times 10^{-2} \right) \quad (9)$$

که در آن  $V_{app}$  ولتاژ اعمالی بر حسب کیلوولت است و طول دبابی برحسب متر است.

با فرض این که نیروی پیشران تولیدی توسط عملگر پلازما متناسب با توان مصرفی خازن معادل در مدار الکتریکی معادل آن است، یون و همکارانش<sup>[۲۰]</sup> رابطه ۱۰ را برای نیروی پیشران تولیدی ارائه کردند:

$$T \cong 2fC_{eq}(V_{app} - V_{bd})^2 \quad (10)$$

که در آن  $T$  نیروی پیشران تولیدی بر واحد طول عملگر،  $f$  فرکانس برحسب کیلوهرتز و  $C_{eq}$  ظرفیت خازن مدار معادل است.  $V_{bd}$  ولتاژ بحرانی است که در آن اولین یونیزاسیون به وقوع می‌پیوندد. در برخی از مطالعات انجام شده<sup>[۱۶]</sup> رابطه تحلیلی ۱۱ برای ولتاژ بحرانی ارائه شده است:

$$V_{bd} = \pi B \sqrt{\frac{p t_d \ln(1 + \gamma^{-1})}{2A}} \quad (11)$$

که در آن  $p$  فشار محیط برحسب تور و  $t_d$  ضخامت دی الکتریک برحسب سانتیمتر و ولتاژ بحرانی برحسب ولت است و  $A = 15 \text{ cm}^{-1} \text{ Torr}^{-1}$  و  $B = 365 \text{ cm}^{-1} \text{ Torr}$  نیز ضرایب هستند.

همچنین برای محاسبه طول گسترش پلاسمای تولیدی از معادله جبری ارائه شده توسط امید و همکارانش<sup>[۱۹]</sup> استفاده شده است. این رابطه جبری باید به صورت عددی حل شود و برای حل این معادله از روش نیوتون - رافسون کلاسیک استفاده شده است (رابطه ۱۲):

$$\begin{aligned} a_1^* l_p^5 + 2a_1 a_2 l_p^4 + a_1^* l_p^3 &= a_1^* \\ a_1 &= 16000 C_g \\ a_2 &= 16000 C_d l_e \\ a_3 &= \sqrt{\rho} f C_g C_d l_e (V_{app} - V_{bd})^2 \end{aligned} \quad (12)$$

این الگو، مستقل بودن غلظت پلاسمای تولیدی از ولتاژ اعمالی بر الکترودهاست. به عبارتی این الگو، به علت استقلال معادلات الکترواستاتیک از یکدیگر، برای عملکردی با مشخصات هندسی و عملکردی خاص کارایی دارد. بوچمال<sup>[۲]</sup> در راستای امکان استفاده از این الگو برای شکل‌های مختلف عملگر با ولتاژهای ورودی مختلف به آن، فرضیه‌هایی را بر مبنای نتایج آزمایشگاهی ارائه کرد. او با استناد به نتایج آزمایشگاهی، رابطه‌هایی برای محل بیشترین توزیع گوسی، ضریب تغییرات توزیع گوسی، طول دبابی و بیشینه غلظت پلاسمای تولیدی برحسب تغییرات ولتاژ اعمالی ارائه داد. ایراد دیگر این الگو، بی‌اثر بودن پارامترهای درگیر در هندسه عملگر در حل معادله توزیع پتانسیل و تولید شارژ است. همچنین اثر فرکانس ولتاژ اعمالی و جنس دی الکتریک نیز در آن دیده نمی‌شود. اخیراً لاین و لی‌بیو<sup>[۱۸]</sup> پیشنهاد جدیدی برای اصلاح الگوی S-H با تغییر توزیع چگالی شارژ روی سطح دی الکتریک ارائه دادند و آن را بر عملکردهایی با ویژگی‌های هندسی و عملکردی مختلف اعمال کردند. همچنین روشی برای تخمین طول گسترش پلاسمای تولیدی بر روی سطح دی الکتریک ارائه شده<sup>[۱۹]</sup> که اثرات هندسه عملگر، ولتاژ و فرکانس ورودی در آن لحاظ شده است.

در پژوهش حاضر شرط مرزی جدیدی به صورت رابطه ۶، و به جای توزیع گوسی روی سطح شارژ مورد استفاده قرار گرفته است به گونه‌ای که این شرط مرزی میان دو معادله حاکم بر مدل ارتباط برقرار می‌کند. در این شرط مرزی جدید از توزیع میدان پتانسیل الکتریکی روی سطح شارژ به صورت بی بعد شده و به عنوان شرط مرزی توزیع غلظت شارژ روی سطح شارژ در طول گسترش پلازما استفاده می‌شود. این شرط مرزی براساس تناسب غلظت شارژ با پتانسیل الکتریکی لحاظ شده است که با داده‌های آزمایشگاهی نیز هم‌خوانی دارد.

$$q_e(x) = q_e^{max}(\phi(x)) \quad (6)$$

می‌توان با تقریب خوبی، نیروی پیشران تولیدی توسط عملگر پلاسمای دی‌بی‌دی را متناسب با توان مصرفی آن دانست. به همین علت یکی از راه‌های مناسب برای محاسبه نیروی پیشران تولیدی توسط عملگر، محاسبه توان مصرفی مدار الکتریکی AC معادل با عملکرد آن است. یون و همکارانش<sup>[۲۱،۲۲]</sup> مدار معادلی متشکل از دو خازن را مطابق شکل ۲ برای عملکرد عملگر پلازما در نظر گرفتند. در این شکل عملگر پلازما به همراه مدار الکتریکی معادل آن که دو خازن سیلندری را شامل می‌شود، نشان داده شده است.  $C_d$  ظرفیت خازن شامل الکتروده درونی و دی الکتریک است،  $C_g$  ظرفیت خازنی است که الکتروده بیرونی و پلاسمای تولیدی را شامل می‌شود و سطح سیلندری آن منطبق بر سطح دی الکتریک است. با استفاده از تعاریف پایه‌ی ظرفیت خازن، برای دو خازن مورد استفاده در مدار معادل عملگر پلازما، ظرفیت‌های دو خازن مطابق روابط ۷ و ۸ به دست می‌آید.

$$C_g = 2\pi\epsilon_0 \frac{l_p}{\ln\left(\frac{r_d t_e + \lambda_d}{r_d t_e}\right)} \quad (7)$$

$$C_d = 2\pi\epsilon_d \frac{l_e}{\ln\left(\frac{r_d t_e + 2t_d}{r_d t_e}\right)} \quad (8)$$

که در آن  $t_e$  ضخامت الکتروده بیرونی،  $t_d$  ضخامت دی الکتریک،  $l_p$  طول گسترش پلاسمای تولیدی روی سطح دی الکتریک،  $l_e$  طول الکتروده درونی،  $\epsilon_0$  ضریب نفوذپذیری الکتریکی خلأ، و  $\epsilon_d$  ضریب نفوذپذیری الکتریکی دی الکتریک است. در تعریف ظرفیت خازن  $C_d$  از طول  $l_e$  که با توجه به هندسه عملگر معلوم است، استفاده شده ولی در تعریف  $C_g$  از طول  $l_p$  که معلوم نیست و متناسب با شرایط کارکردی عملگر متغیر خواهد بود، استفاده شده است.

که در آن،

$$C_{g^*} = \frac{C_g}{l_p}, \quad C_{d^*} = \frac{C_d}{l_e} \quad (13)$$

از آنجا که حداقل طول پلاسمای تولیدی توسط نتایج آزمایشگاهی [۱۶] برابر ۲٫۵ میلی متر است، برای تصحیح اختلاف نتایج با داده های پیشین، [۲۳] یک ضریب تصحیح  $\alpha_{corr}$  برای طول پلاسمای تولیدی روی سطح طبق رابطه ی ۱۴ پیشنهاد شده است. در این رابطه  $l_p^{solved}$  طول پلاسمای به دست آمده از حل معادله است.

$$l_p^{corr} = \begin{cases} \alpha_{corr} l_p^{solved} & \alpha_{corr} l_p^{solved} > 0.0025 \\ 0.0025 & \alpha_{corr} l_p^{solved} < 0.0025 \\ l_e & \alpha_{corr} l_p^{solved} > l_e \end{cases} \quad (14)$$

## ۵. نحوه ی حل معادلات

برای حل معادلات میدان پتانسیل الکتریکی و توزیع غلظت پلازما بهتر است معادلات و شرایط مرزی آنها به شکل بی بعد باشند. بدین ترتیب می توان پس از حل معادلات، پتانسیل الکتریکی و توزیع غلظت شارژ را برای هر دامنه ی ولتاژی به دست آورد. نحوه ی بی بعد سازی در روابط ۱۵ و ۱۶ آمده است. با اعمال این بی بعد سازی دو رابطه حاکم بر مدل الکترواستاتیک به روابط ۱۷ و ۱۸ تبدیل می شوند.

$$\varphi^* = \phi / \phi^{max} f(t) \quad (15)$$

$$q_c^* = q_c / q_c^{max} f(t) \quad (16)$$

$$\nabla E^* = \nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \varphi^*) = 0 \quad (17)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla q_c^*) = \frac{q_c^*}{\lambda_d^2} \quad (18)$$

حل معادلات پلازما و همچنین جریان سیال توسط نرم افزار تجاری کامسول ۵ انجام شده است که بر پایه ی روش المان محدود است. بدین ترتیب معادلات انتقال تعریف شده برای حل میدان پتانسیل الکتریکی و توزیع غلظت شارژ، مجزا از معادلات جریان سیال حل شده و نیروی حجمی تولیدی به دست می آید.

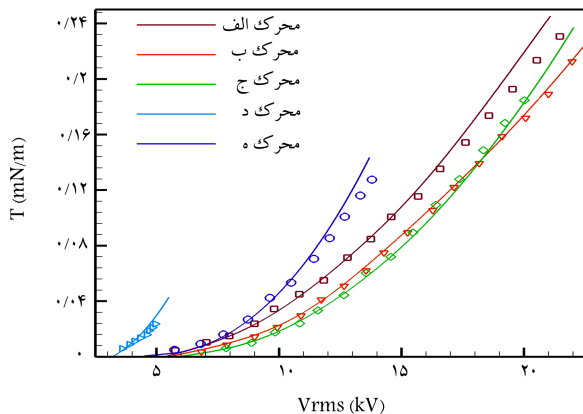
## ۶. نتایج

### ۶.۱. اعتبارسنجی تخمین نیروی پیشران و طول گسترش پلازما

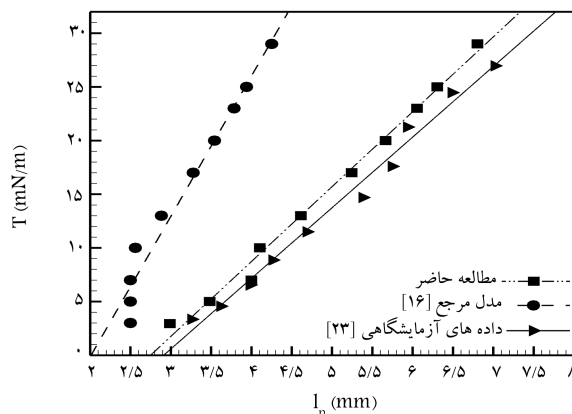
به منظور بررسی دقت الگوی پیشنهادی در پیش بینی نیروی پیشران تولیدی توسط عملکرد پلازما، چندین آزمون آزمایشگاهی انتخاب و جهت اعتبارسنجی به کارگرفته شده است. در بررسی دقت مدل در پیش بینی نیروی پیشران تولیدی از نتایج آزمایش توماس و همکارانش [۲۲] استفاده شده است. مشخصات هندسی و عملکردی عملکرد مورد استفاده در این پژوهش شامل ضخامت الکترودها برابر ۴۰ میکرومتر و طول الکترودها ۵٫۸ سانتی متر است. همچنین جنس دی الکتریک، ضخامت آن و فرکانس اعمالی به عملکرد در حالت های مختلف در جدول ۱ آمده است. در شکل ۳ نتایج الگوی پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی برای عملگرهای معرفی شده در جدول ۱ مقایسه شده است. چنان که مشاهده می شود، نتایج این الگو با دقت بالایی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی است. همچنین نتایج حاصله نشان می دهد که

جدول ۱. مشخصات هندسی و عملکردی عملکرد مورد استفاده در آزمایش توماس و همکارانش. [۲۲]

حالت عملکرد	$\epsilon_r$	$t_d$ (mm)	$f$ (kHz)
الف	۱٫۰	۳٫۱۸	۲٫۱
ب	۳٫۵	۶٫۳۵	۲٫۳
ج	۴٫۲	۶٫۳۵	۲٫۳
د	۳٫۹	۰٫۱۵	۴٫۴
ه	۶٫۰	۳٫۱۸	۲٫۳



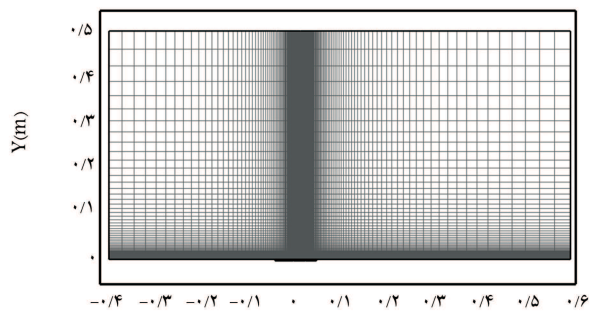
شکل ۳. اعتبارسنجی نیروی پیشران تولیدی در مقایسه با تجربی [۲۲] (خطوط: نتایج مطالعه حاضر، نشانه ها: نتایج تجربی).



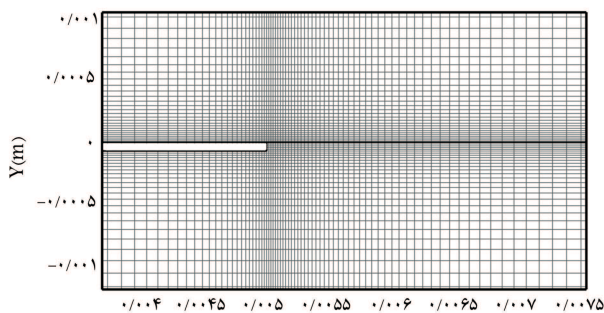
شکل ۴. اعتبارسنجی معادله ی طول پلازما در مدل پیشنهادی و مقایسه ی آن با نتایج تجربی [۲۳] و الگوی مرجع. [۱۶]

الگوی پیشنهادی در عملکرد عملگرهای مختلف با مشخصات هندسی و عملکردی مختلف کارآ بوده و نتایج مطلوبی را ارائه می دهد.

جهت اعتبارسنجی تخمین طول گسترش پلاسمای تولیدی در الگوی پیشنهادی، آزمون تجربی دارسچرو روی [۲۳] انتخاب شده که در آن نیروی پیشران تولیدی به صورت تابعی از طول پلازما ترسیم شده و ارتباطی خطی میان این دو پارامتر معرفی شده است. عبدالله زاده و همکاران نیز با الگوی پیشنهادی خود این کار را تکرار کرده اند. [۱۶] در شکل ۴ مقایسه این نتایج نشان داده شده است. چنان که مشاهده می شود نتایج الگوی پیشنهادی با دقت بسیار خوبی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی است.

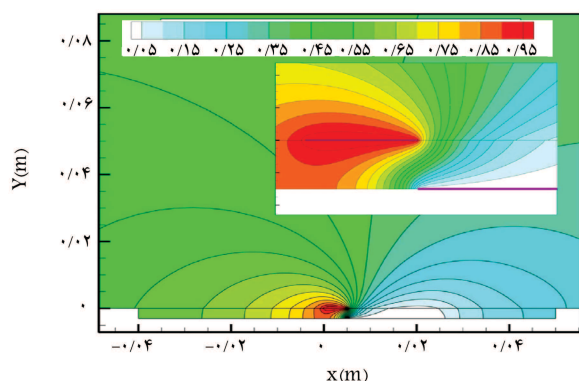


الف) شبکه تولیدی در تمام دامنه محاسباتی؛

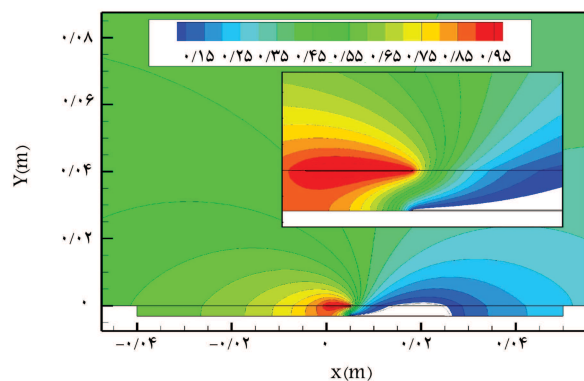


ب) شبکه تولیدی در نزدیکی الکتروود.

شکل ۵. شبکه‌ی محاسباتی تولیدی پیرامون عملگر پلاسمایی در شبیه‌سازی جریان سیال روی صفحه تخت.



الف) نتایج مرجع [۱۶]



ب) مدل سازی حاضر.

شکل ۶. مقایسه‌ی توزیع میدان پتانسیل الکتریکی.

## ۲.۶. اعتبارسنجی اثر عملگر پلازما روی جریان صفحه‌ی تخت

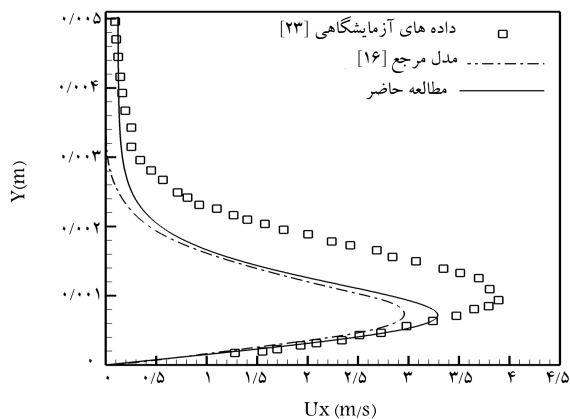
در این بخش برای نشان دادن توانایی الگوی ارتقاء یافته‌ی پیشنهادی، شبیه‌سازی اثر عملگر پلاسمایی بر جریان ساکن هوا روی صفحه‌ی تخت در مقاطع مختلف ارائه شده است. برای این منظور از نتایج آزمایشگاهی دارسچرو روی [۲۳] استفاده شده است. در این آزمون، هوای ساکن بر یک صفحه‌ی تخت در فشار اتمسفریک قرار دارد. با فعال کردن عملگر پلازما با دامنه‌ی ولتاژ ۱۰ کیلوولت در فرکانس ۱۴ کیلوهرتز، هوای موجود روی عملگر در اثر تولید نیروی حجمی تحریک شده و مومنوم انتقال یافته به آن سبب تولید یک جت دیواره می‌شود. ضخامت ناحیه‌ی جت تولیدی در مقایسه با مدل اولیه‌ی سوزن و هوانگ [۸] کاملاً اصلاح شده و دقت بهتری را در نتایج نشان می‌دهد. در این پژوهش از عملگری با مشخصات هندسی و عملکردی، طول الکتروود بیرونی برابر ۰/۵ سانتی‌متر، طول الکتروود داخلی برابر ۲ سانتی‌متر، جنس الکتروودها از ورقه‌ی مس با ضخامت ۷۰ میکرومتر، جنس دی‌الکتریک آکریلیک با نفوذپذیری الکتریکی نسبی ۳ و ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده شده است.

دامنه‌ی محاسباتی انتخاب شده برای حل عددی جریان، مستطیلی به طول ۱ متر و عرض ۰/۵ متر است (شکل ۵). در دامنه‌ی 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 فعال ساختن عملگر در ورودی جریان (وجه چپ) شرط مرزی سرعت صفر لحاظ شده است. برای دستیابی به طول بیشتری از جت تولیدی روی صفحه‌ی تخت محل قرارگیری عملگر متماثل به ورودی جریان نصب شده است. از شبکه‌ی سازمان‌یافته با تراکم بالا در نواحی اطراف عملگر پلاسمایی استفاده شده است. در شکل ۵ با دو مرحله بزرگ‌نمایی، شبکه‌ی تولیدی در اطراف عملگر و در تمام دامنه‌ی محاسباتی نشان داده شده است. شبکه در نزدیکی الکتروودهای عملگر ریز شده و ارتفاع کوچک‌ترین سلول در نزدیکی دیواره ۳۰ مرتبه کمتر از طول دبی در نظر گرفته شده است تا پدیده‌های فیزیکی به خوبی تسخیر شوند.

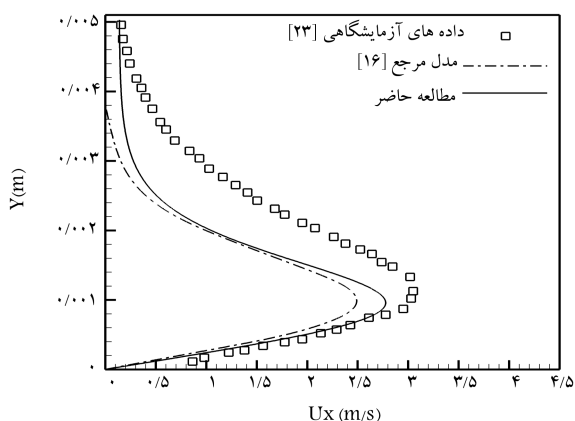
با استفاده از شبکه‌ی محاسباتی تولید شده و پارامترهای مدل‌سازی ارائه شده در بخش‌های قبل، معادلات الکترواستاتیک و معادلات جریان سیال تراکم‌ناپذیر توسط حل‌کننده‌های جداگانه حل شده است. نتایج به دست آمده در توزیع میدان پتانسیل الکتریکی و غلظت پلاسمای تولیدی با نتایج مدل‌سازی عبدالله‌زاده و همکاران [۱۶] در شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه شده است. در هر دو شکل، توزیع میدان پتانسیل الکتریکی و غلظت پلاسمای تولیدی از نظر کیفی تقریباً یکسان است اما اصلاحات انجام شده در الگوی پیشنهادی سبب تغییراتی در توزیع پلاسمای تولیدی روی سطح دی‌الکتریک شده است.

در شکل ۸ نیز کانتورهای سرعت جت تولیدی برای الگوی حاضر با مطالعات قبلی [۱۶] مقایسه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، در این آزمایش با توجه به نتایج روی و دارسچر [۲۳]، عملگر بیشینه سرعت ۶ متر بر ثانیه را در جت تولیدی به وجود می‌آورد، در حالی که در مدل‌سازی عبدالله‌زاده و همکاران [۱۶] بیشترین سرعت القایی در حدود ۴/۶ متر بر ثانیه است. در مدل‌سازی حاضر با دستیابی به سرعت بیشینه ۵/۸ متر بر ثانیه، در حدود ۳ درصد خطا نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارسچرو روی خواهیم داشت، که دقت مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ی آزمایشگاهی دارسچرو و روی [۲۳] دو پروفیل سرعت محوری نیز در دو مقطع به فاصله‌ی ۲۵ میلی‌متر و ۳۵ میلی‌متر از لبه‌ی حمله‌ی الکتروود بیرونی ارائه شده است. در شکل ۹ و شکل ۱۰ مقایسه‌ی این دو پروفیل در مطالعه‌ی حاضر و مطالعات پیشین [۲۳، ۱۶] ارائه شده است. بر این اساس، الگوی حاضر تطابق بهتری



شکل ۹. مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت محوری در مقطع ۲۵ میلی‌متر با نتایج آزمون دارسچر و روی [۲۳] و نتایج مدل مرجع [۱۶]

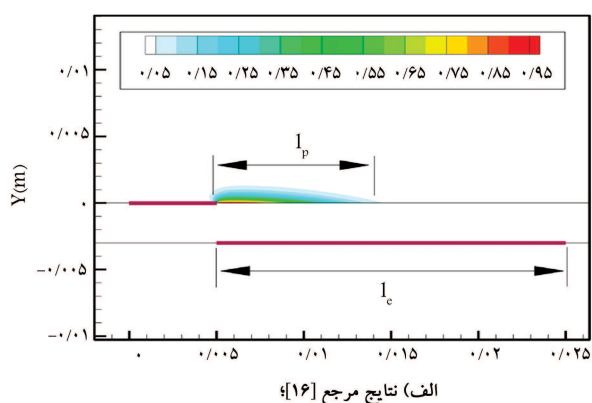


شکل ۱۰. مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت محوری در مقطع ۳۵ میلی‌متر با نتایج آزمون دارسچر و روی [۲۳] و نتایج مدل مرجع [۱۶]

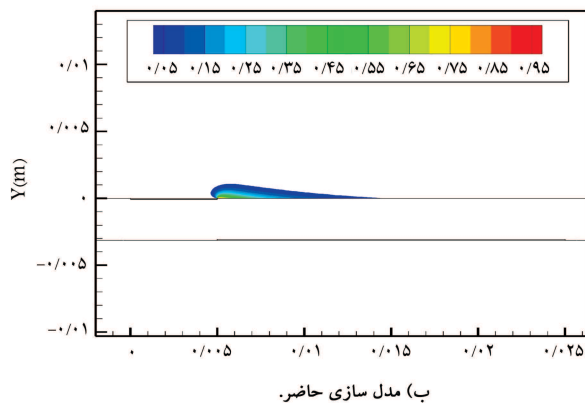
نسبت به الگوی مدل عبدالله‌زاده و همکاران در پیش‌بینی پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف دارد.

## ۷. نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌های مطالعاتی عملگرهای پلاسما، محدودیت امکان حل عددی پدیده‌ی تخلیه‌ی شارژ و اندرکنش آن با جریان سیال است. این امر به علت پیچیدگی حل یک مجموعه‌ی هم‌بند از معادلات ماکسول و معادلات ناویر-استوکس روی می‌دهد. تلاش‌های بسیاری در این راستا برای کم کردن این محدودیت در مقیاس‌های مهندسی صورت گرفته که یکی از موفق‌ترین و فیزیکی‌ترین آنها الگوی الکترواستاتیک سوزن و هوانگ است. این الگو نواقص و محدودیت‌هایی دارد که امکان استفاده از آن برای شکل‌های مختلف عملگر و شرایط مختلف کارکردی وجود ندارد. پیوسته سعی شده تا ضمن رفع این محدودیت‌ها، تطابق بهتری میان این الگو و نتایج آزمایشگاهی برقرار شود. پژوهش حاضر با ارائه‌ی شرط مرزی جدیدی منطبق بر نظریه‌ی الکترواستاتیک، به جای توزیع گوسی برای توزیع شارژ روی سطح دی‌الکتریک، دقت این الگو را در شبیه‌سازی غلظت شارژ و نیروی حجمی تولیدی ارتقاء داده است.

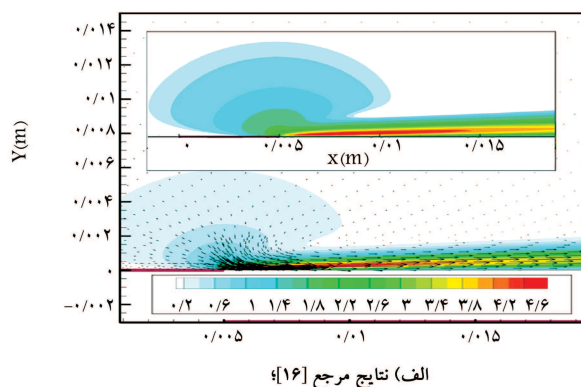


الف) نتایج مرجع [۱۶]

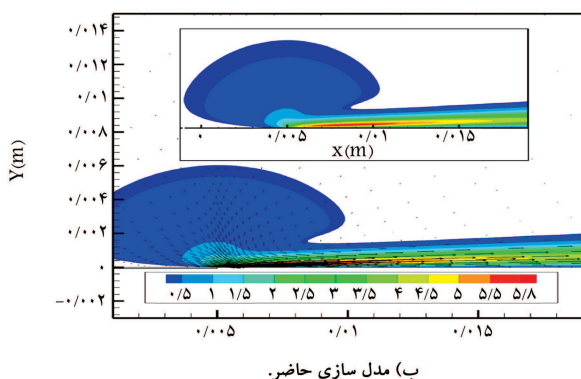


ب) مدل سازی حاضر.

شکل ۷. مقایسه‌ی توزیع غلظت پلاسمای تولیدی.



الف) نتایج مرجع [۱۶]



ب) مدل سازی حاضر.

شکل ۸. مقایسه‌ی کانتور سرعت جت تولیدی و بردارهای آن در شبیه‌سازی روی صفحه صاف.

1. dielectric-barrier-discharge (DBD) plasma actuator
2. lumped-element circuit model
3. linearized force distribution
4. potential flow model
5. reynolds-averaged navier-stokes (RANS)

## منابع (References)

1. Erfani, R., Zare Behtash, H., Hale, C. and K. Kontis. "Development of DBD plasma actuators: the double encapsulated electrode", *Acta Astronautica*, **109**, pp. 132-143, (2015).
2. Kriegseis, J., Simon, B. and Grundmann, S. "Toward In-Flight Application?, A Review on Dielectric Barrier Discharge-Based Boundary-Layer Control", *Applied Mechanics Reviews*, **68**(2), (2016).
3. Bouchmal, A., *Modeling of Dielectric-Barrier Discharge Actuator*, Implementation, Validation and generalization of an electrostatic model, Master of Science thesis, Delft University of Technology, (March 2011).
4. Jacob, J.D., Ramakumar, K., Anthony, R. and Rivir, R.B. "Control of laminar and turbulent shear flows using plasma actuators", 4th International Symposium on Turbulence and Shear-flow Phenomena, June 27-29 2005.
5. Post, M.L. and Corke, T.C. "Separation control using plasma actuators stationary and oscillating airfoils", AIAA PaPer 2004-0841.
6. Jukes, Timothy N. "Turbulent drag reduction using surface plasma", PhD diss., University of Nottingham, (2007).
7. Roth, J.R., Dai, x. "Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device", 44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, (2006).
8. 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).
9. Suzen, Y.B. and Huang, P.G. "simulation of flow separation control using plasma actuators", AIAA PaPer 877, (2006).
10. Orlov, D.M. and Corke, T.C. "Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator", AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 44, (2006).
11. Jayaraman, B. and Shyy, W. "Modelling of dielectric barrier discharge-induced fluid dynamics and heat transfer", *Progress in Aerospace Science*, **44**(3), 44, (2008).
12. 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, (2005).
13. Thomson, R.J. and Moeller, T.M. "Numerical investigations of plasma actuator lorentz body forces", AIAA paper 1032, (2012).
14. Omid, J. and Ebrahimi, A. "Voltage and frequency effect on plasma actuator performance on flow separation bubble control", *4th Conference of Engineering and Physics of Plasmas*, Yazd, Iran, (2016).
15. 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).
16. 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*, **14**(8), (2014).
17. I. H. Ibrahim, M. Skote, "Effects of the scalar parameters in the Suzen-Huang model on plasma actuator characteristics", *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, **23**(6), (2013).
18. J. Laten, R. LeBeau, "Improving the performance of a DBD plasma actuator model through modification of boundary condition parameters", AIAA 2016-0840, (2016).
19. K. Mazaheri, J. Omid, and K. C. Kiani, "Simulation of DBD plasma actuator effect on aerodynamic performance improvement using a modified phenomenological model", *Computers & Fluids*, **140**, (2016).
20. Yoon, J.S. and Huam, J.H. "Semi-empirical thrust model of dielectric barrier plasma actuator for flow control", *J. Aerospace Engineering*, **28**(1), (2015).
21. Yoon, J.S. and Huam, J.H. "One-equation modeling and validation of dielectric barrier discharge plasma actuator thrust", *Journal of Physics D: Applied Physics*, **47**(40), 405202, (2014).
22. 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*, **47**, (2009).
23. Durscher, R. and Roy, S. "Evaluation of Thrust Measurement Technique for Dielectric Barrier Discharge Actuators", *Exp. Fluids*, **53**(4), 1165-1176, (2012).