

شبیه‌سازی عددی چند ساختار از عملگرهای پلاسما و ارزیابی عملکرد آن‌ها بر روی ایرفویل‌های NACA 0012 و NACA 0015

میرزایی، سعید^۱، پسندیده فرد، محمود^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰)

چکیده

عملگرهای پلاسمایی ابزار قدرتمندی جهت کنترل فعال جریان و لایه مرزی و نیز به عقب انداختن جدایش روی سطوح کنترلی هستند که در دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران و مهندسين علوم هوافضایی قرار گرفته است. در ابتدا، ساختار استاندارد عملگرهای پلاسمایی (که شامل الکتروود پنهان یک‌تکه‌ای می‌باشد) در پژوهش‌ها و تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما اخیراً ساختاری جدید از این عملگرها معرفی شده است که شامل یک الکتروود پنهان چندتکه‌ای می‌باشد. چندتکه‌ای بودن الکتروود پنهان در این عملگرها باعث بازیابی نیروی حجمی عملگر پلاسما شده و سرعت القایی آن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. در این مقاله با استفاده از روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی، عملگر پلاسمای یک‌تکه‌ای و سه‌تکه‌ای شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی شده است و سپس با بررسی عددی کارکرد عملگر پلاسمای سه‌تکه‌ای و یک‌تکه‌ای بر روی ایرفویل‌های NACA 0012 و NACA 0015 مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده است که استفاده از عملگر پلاسما سبب انتقال زاویه واماندگی ایرفویل به عقب شده و به این سبب باعث بهبود توزیع ضریب فشار می‌شود. از طرفی نشان داده شده که استفاده از ساختار سه‌تکه‌ای نسبت به حالت استاندارد، بازدهی عملگر پلاسما را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. این تحقیق در عدد رینولدز جریان انجام شده و عملگر پلاسما با منبع ولتاژ متناوب سینوسی با ولتاژ ۱۶ کیلوولت و فرکانس ۱۰ کیلوهرتز در حالت دائم شبیه‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: کنترل فعال جریان، عملگر پلاسما، الکترواستاتیک-مدار تجمعی، شبیه‌سازی عددی

Numerical Simulation of several Structures of Plasma Actuators and Their Performance Assessment over NACA 0012 and NACA 0015 Airfoils

Abstract

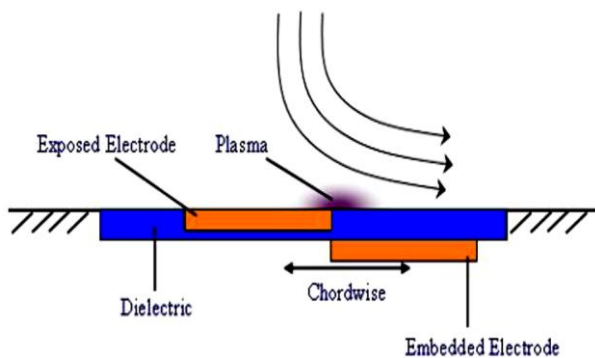
The Plasma Actuators (Dielectric Barrier Discharges) are strong tools for active flow and boundary layer control that cause to postpone the location of separation point on control surfaces which recently have been a focus point for aerospace scientists and engineers. In first stages, standard structure of DBD (include one-particle encapsulated electrode) was used in researches, but recently a new structure which include a three particles encapsulated electrode is employed. Encapsulated three-particle electrodes cause to recover the body force of plasma actuator and increase the induced velocity, significantly. In this paper by Electro-Static Lumped-element numerical method is applied and validated. Then, the three-particle and one-particle plasma actuators are used for NACA0012 and NACA0015 airfoils. It is numerically shown that the separation point displaces back and the pressure distribution is changed favorably using DBD. It is also found that the effectiveness of three-particle structure is considerably higher than the standard structure. This research was performed at $Re_c=1.0 \times 10^6$ and the plasma actuator simulated for high voltage AC power supply up to $14kV_{p-p}$ with 10 kHz frequency in steady state condition

Keywords: Active Flow Control, Plasma Actuator, Electro-Static Lumped-Element, NACA0012, NACA0015.

مقدمه

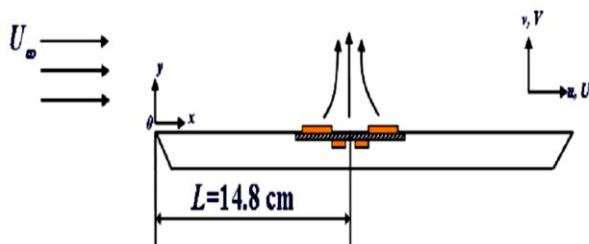
عملگرهای دی الکتریک، آرایش و پیکربندی بسیار ساده‌ای دارند. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، این نوع از عملگرها شامل دو صفحه فلزی به‌عنوان الکترودها هستند که با آرایش خاصی در دو طرف یک ماده عایق دی الکتریک قرار گرفته‌اند؛ یکی از این الکترودها در معرض هوا قرار داده شده است و به‌راحتی دیده می‌شود و الکتروده دیگر، در داخل ماده عایق پنهان شده است. معمولاً الکترودها را بلند و نازک انتخاب می‌کنند و به‌صورت طولی روی سطح آیرودینامیکی قرار می‌دهند. جنس دی الکتریک نیز اغلب، کپتون و یا تفلون است. عملگر پلازما به هیچ وجه سطح زیادی در مقابل جریان ندارد و لذا قرار دادن آن بر روی سطح آیرودینامیکی موجب به‌وجود آمدن مقاومت بیشتر از این حد نمی‌شود.

بیشتری زیاد کرد (بدون آن که از اشباع دی الکتریک نگران باشیم) و لذا نیروی پیشران نیز افزایش می‌یابد. ژاکوب در [۵] به بررسی و مقایسه سه هندسه مختلف پرداخت. هندسه اولی که در این رابطه بررسی می‌شود، همان هندسه متداول خطی می‌باشد. نحوه قرارگیری الکترودها در این حالت در شکل (۱) دیده می‌شود. ژاکوب و البته دیگران در کارهای خود نشان داده‌اند که این هندسه تولید یک جت افقی می‌کند (شکل (۲)).

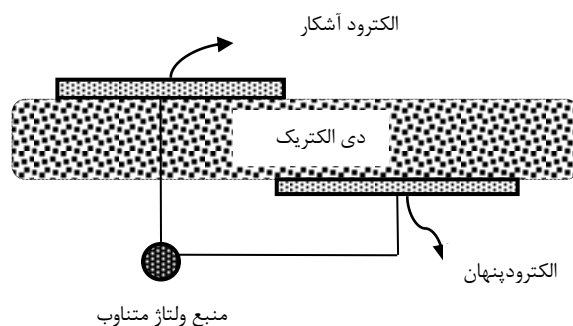


شکل ۲- نیروی وارد بر جریان سیال توسط عملگر پلازما [۵]

هندسه بعدی که مورد بررسی قرار گرفته است، در شکل ۳ دیده می‌شود. این آرایش به آرایش دونات‌شکل معروف بوده و جت‌های پلازما در راستای قائم تولید می‌کند. در ابتدا ساختار یک تکه‌ای (شکل (۱)) عملگرهای پلازما مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما در سال ۲۰۱۲ با ارائه‌ی ساختار چندتکه‌ای که در مرجع [۶] به آن اشاره شده است، دریچه‌ای جدید بر روی پژوهشگران برای استفاده‌ی هرچه مفیدتر از این ابزار باز شد. در شکل ۴ شماتیکی از این مدل تکه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۳- آرایش دونات‌شکل الکترودها [۵]

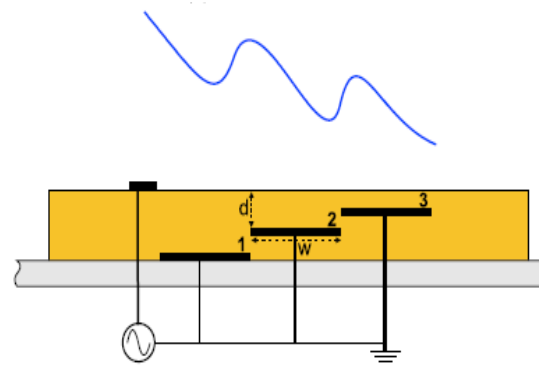


شکل ۱- شماتیک یک عملگر پلازما

بخش عمده کارهای انجام گرفته در مورد عملگرهای پلازما، در خصوص تعیین اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد و میزان نیروی پیشران و نیز بهینه‌سازی این پارامترها بوده است. یکی از پیشگامان مهم این عرصه انلول است که در [۱-۳] به همراه توماس اثر پارامترهای مختلفی از جمله ولتاژ، فرکانس ورودی، جنس و ضخامت دی الکتریک را بر نیروی پیشران عملگر بررسی کرد؛ وی دریافت که در حالتی که تابع ورودی قسمت نیم سیکل اول بزرگتری داشته باشد (در بیشتر زمان‌ها مقادیر ولتاژ مثبت باشد)، عملگر بسیار باکیفیت‌تر خواهد بود و نیروی پیشران آن بیشتر می‌شود. توماس نیز در [۴] به بررسی اثر جنس و ضخامت دی الکتریک پرداخت. او دریافت که هر قدر ضخامت دی الکتریک بالاتر باشد، می‌توان ولتاژ ورودی را تا مقادیر

مورد تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد عملگر پلاسما می‌باشد.

در مرجع [۷] از عملگرهای پلاسمایی برای کنترل فعال جریان روی NACA 0024 استفاده شده است. این تحقیق تجربی در عدد رینولدز برابر انجام گرفته و سپس مقایسه‌ای بین حالت‌های مختلف صورت پذیرفت، به طوری که الکترودها بین لبه‌ی حمله و ۰/۲۵ طول وتر و در زوایای حمله ۸، ۱۲ و ۱۶ درجه نصب می‌شدند. ایرفویل استفاده شده در این تحقیق نمونه‌ای از ایرفویل‌هایی است که در توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این تحقیق با کنترل فعال جریان به وسیله‌ی عملگر پلاسما به این نتیجه می‌رسد که با استفاده از این عملگرها می‌توان بازده توربین‌های بادی را افزایش داد.



شکل ۴- ساختار تکه‌ای عملگر پلاسما [۶]

جدول (۱) شامل اطلاعاتی درباره‌ی ابعاد الکترودها و سرعت القاشده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مدل جایگزین شده یک روش ارزان و مفید برای تحقیق در

جدول ۱- مشخصات منبع ولتاژ متناوب، ابعاد عملگر پلاسما و سرعت القایی آن [۶]

| ولتاژ (کیلوولت) | فرکانس (کیلوهرتز) | d1 (μm) | d2 (μm) | d3 (μm) | w1 (mm) | w3 (mm) | سرعت القایی (m/s) |
|-----------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------|
| ۱۶ | ۱۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۴۰ | ۵ | ۱/۷ |
| ۱۶ | ۱۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۳۶۰ | ۲۰ | ۱۰ | ۲/۲۸ |
| ۸ | ۱۰ | ۱۸۰ | ۱۸۰ | ۵۴۰ | ۵ | ۴۰ | ۱/۲ |
| ۱۶ | ۱۰ | ۵۴۰ | ۳۶۰ | ۱۸۰ | ۴۰ | ۵ | ۲/۳۲ |
| ۸ | ۱۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۱۸۰ | ۵ | ۴۰ | ۰/۳۱ |
| ۱۲ | ۱۰ | ۱۸۰ | ۳۶۰ | ۵۴۰ | ۵ | ۴۰ | ۱/۴۴ |
| ۸ | ۱۰ | ۵۴۰ | ۱۸۰ | ۱۸۰ | ۴۰ | ۵ | ۰/۵۵ |
| ۱۶ | ۱۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۱۸۰ | ۵ | ۴۰ | ۱/۹۱ |
| ۱۲ | ۲۰ | ۱۸۰ | ۳۶۰ | ۵۴۰ | ۴۰ | ۵ | ۱/۲۷ |
| ۱۲ | ۱ | ۳۶۰ | ۳۶۰ | ۵۴۰ | ۵ | ۴۰ | ۰/۸۲ |
| ۱۲ | ۲۰ | ۱۸۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۱۰ | ۲۰ | ۱/۵۸ |
| ۱۲ | ۱۰ | ۱۸۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۱۰ | ۲۰ | ۲/۱۳ |
| ۱۲ | ۲۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۵ | ۴۰ | ۰/۷۹ |
| ۱۶ | ۱۰ | ۵۴۰ | ۱۸۰ | ۱۸۰ | ۱۰ | ۲۰ | ۱/۸۷ |
| ۱۴ | ۱۰ | ۱۸۰ | ۳۶۰ | ۵۴۰ | ۵ | ۴۰ | ۱/۷۱ |
| ۱۴ | ۱۰ | ۱۸۰ | ۱۸۰ | ۵۴۰ | ۲۰ | ۱۰ | ۱/۶۸ |

عملگر و در نهایت نیروی حجمی تولید شده به وسیله‌ی آن‌ها بررسی کرد؛ دوم این‌که از این عملگرها روی ایرفویل‌های متفاوت که در معرض عبور جریان قرار دارند، استفاده شود تا مشخص گردد که تا چه میزان می‌توانند روی جریان تأثیر گذاشته و عملکرد ایرفویل را بهبود بخشند.

عملکرد عملگرهای پلاسمایی در دو حوزه قابل بررسی است. اول این‌که می‌توان عملگر پلاسما را از لحاظ ساختاری و فارغ از این‌که این عملگرها چه تأثیری می‌توانند روی جریان داشته باشند و به واسطه‌ی پارامترهایی مانند میزان جریان الکتریکی عبورکننده از پلاسما، سرعت القاشده توسط

بنابراین در نیم سیکل اول تخلیه بار توسط میدان خارجی صورت می‌گیرد و در نیم سیکل دوم تخلیه بار توسط میدان ناشی از بارهای جمع شده صورت می‌پذیرد و چون هر کدام از این میدان‌ها بر میدان دیگری اثر می‌گذارد، اجازه شار دائمی به بارها داده نمی‌شود و لذا این نوع از عملگرها محدودکننده خود می‌باشند.

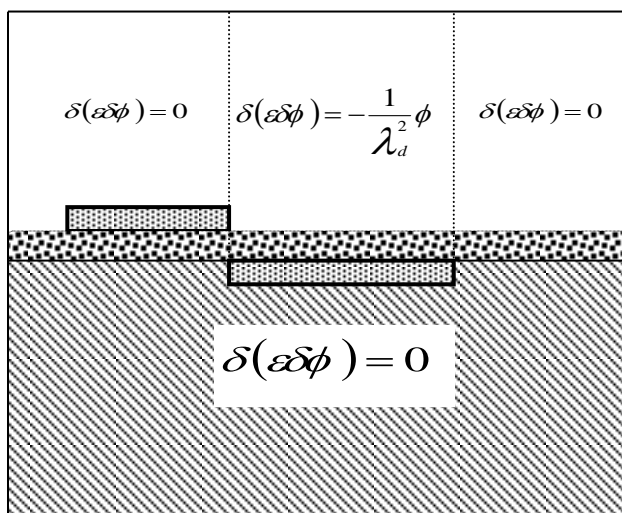
به دلیل همین خاصیت خودمحدودکنندگی در یک عملگر پلاسما، قوس الکتریکی تشکیل نمی‌شود. فرض کنید در شروع نیم‌سیکل جلورونده یا نیم‌سیکل رفت هستیم. در این حالت الکتروند آشکار دارای ولتاژ منفی بیشینه، مثلاً ۵۰۰۰- ولت و الکتروند پنهان به زمین متصل است. لذا الکترون‌ها از سطح الکتروند آشکار به سمت الکتروند پنهان حرکت می‌کنند. این الکترون‌ها در مسیر حرکت خود با ذرات هوا برخورد کرده و آن‌ها را نیز یونیزه می‌کنند و به‌طور کلی، چون الکترون‌ها توسط میدان به سمت راست (الکتروند پنهان) کشیده می‌شوند، عکس‌العمل این نیرو، مولکول‌های هوا را به سمت چپ خواهد کشید و لذا مومنتوم وارد به سیال به سمت چپ خواهد بود. اما الکترون‌ها چون امکان شارش به الکتروند پنهان را ندارند، در دورترین نقطه نسبت به لبه‌ی الکتروند آشکار، روی سطح دی‌الکتریک تجمع پیدا می‌کنند؛ تجمع الکترون‌ها روی سطح دی‌الکتریک، میدانی خلاف میدان خارجی درست می‌کند؛ مثلاً به مرور میدانی برابر ۵۰۰۰- ولت ناشی از تجمع الکترون‌ها روی سطح دی‌الکتریک ایجاد می‌شود که ولتاژ الکتروند آشکار را کاملاً خنثی می‌کند؛ در این لحظه ولتاژ الکتروند آشکار به یکباره ۵۰۰۰+ ولت می‌شود. در شروع نیم‌سیکل برگشت، اختلاف پتانسیل عملاً ۱۰۰۰۰ ولت است و نه ۵۰۰۰ ولت و لذا الکترون‌ها با سرعت و شتاب بیشتری به سمت الکتروند آشکار حرکت می‌کنند. عکس‌العمل این حرکت، نیروی بزرگتری به سمت راست به وجود می‌آورد. لذا یک نیروی خالص وجود دارد که کار انجام می‌دهد. از نظر زمانی، تولید پلاسما در ۸- ۱۰ ثانیه صورت می‌گیرد، در حالی که ۰/۰۱ ثانیه طول می‌کشد تا تأثیر نیروهای پلاسما بر جریان خارجی ظاهر شود. با استفاده از همین تفاوت بسیار زیاد می‌توان نتیجه گرفت که بازآرایی یون‌ها و به‌عبارت دیگر تشکیل پلاسما یک پدیده لحظه‌ای و یکباره است. با در نظر گرفتن این امر،

در مرجع [۶] عملگرهای پلاسمایی که الکتروند پنهان سه‌تکه‌ای دارند، معرفی شده و تلاش شده است که ساختاری بهینه از این نوع عملگرها که دارای سرعت القایی قابل‌قبولی باشند، ارائه گردد. بدین ترتیب عملگرهای پلاسمایی سه‌تکه‌ای تنها از لحاظ ساختاری بررسی شده است. در مقاله حاضر از عملگر سه‌تکه‌ای و یک‌تکه‌ای به این دلیل روی ایرفویل‌های NACA 0012 و NACA 0015 استفاده شده است که ساختار جدید ارائه شده توسط مرجع [۶] بر روی جریان عبوری از روی ایرفویل تا چه اندازه تأثیرگذار بوده و سبب بهبود پارامترهای آیرودینامیکی می‌شود. از طرفی با به‌کارگیری عملگر پلاسمایی روی ایرفویل‌های یادشده، این موضوع بررسی شده است که عملگر پلاسمایی روی ایرفویل‌های متقارن نازک بهتر عمل می‌کند یا روی ایرفویل‌های متقارن ضخیم. به این منظور دو کد جداگانه نوشته شده است؛ کد نخست توزیع پتانسیل القایی در اطراف الکتروندها را به‌دست می‌دهد. خروجی این کد به عنوان ورودی کد دوم که تحلیل آیرودینامیک جریان را انجام می‌دهد، به‌کار گرفته می‌شود.

نحوه‌ی عملکرد و مدل‌سازی عددی

برای ایجاد پلاسما باید الکتروند آشکار را به منبعی با ولتاژ بالا و فرکانس بالا وصل و الکتروند پنهان را به زمین متصل کنیم. هنگامی که الکتروند آشکار را به منبع وصل می‌کنیم، تفکیک یونی بر فراز دی‌الکتریک تشکیل می‌شود. به‌محض تفکیک یون‌ها، مجموعه یون‌ها و الکترون‌ها نسبت به میدان خارجی واکنش نشان داده و به سمت الکتروند پنهان به حرکت در می‌آیند. این حرکت ذرات باردار به باد یونی موسوم می‌باشد. به‌تدریج ذرات باردار بر روی سطح الکتروند پنهان جمع شده و لذا سرعت باد یونی کاهش می‌یابد. اما قبل از این‌که یون‌ها از حرکت بایستند، پتانسیل منبع عوض شده و در اینجا بارهایی که بر روی سطح پنهان جمع شده‌اند، به سمت الکتروند آشکار به حرکت در می‌آیند. در نیم سیکل دوم مقدار تخلیه به تعداد الکترون‌هایی بستگی دارد که در نیم سیکل قبلی بر روی الکتروند پنهان قرار گرفته‌اند.

شکل (۶) دامنه‌ی حل معادله‌ی الکترواستاتیک را نشان می‌دهد. شرایط مرزی به‌گونه‌ای تنظیم شده است که مقادیر پتانسیل الکتریکی بر روی الکترودهای مثبت و منفی به ترتیب $\phi_0 + \phi$ و $\phi_0 - \phi$ معلوم باشد و در نقاط دور دست کل میدان حل $\phi = 0$ در نظر گرفته شود. از حل معادله‌ی الکترواستاتیک ϕ میدان حل به دست می‌آید.



شکل ۶- دامنه و شرایط مرزی حل معادله‌ی الکترواستاتیک برای به دست آوردن پتانسیل الکتریکی

سپس با استفاده از رابطه‌ی (۲)، میدان الکتریکی \vec{E} به دست می‌آید.

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

در این صورت با فرض یک مقدار مشخص برای شعاع دبابی پلاسما (λ_d) که از طریق کالیبراسیون‌های تجربی در منابع ذکر شده است، می‌توان چگالی بار را طبق رابطه‌ی (۳) به دست آورد.

$$\rho_c = -\frac{\epsilon_0}{\lambda_d^2} \phi \quad (3)$$

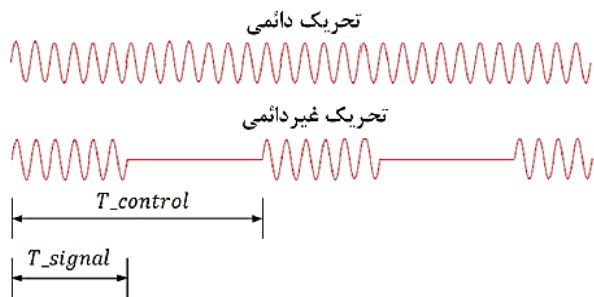
لذا با داشتن میدان الکتریکی و میدان چگالی بار می‌توان میدان نیرویی ناشی از پلاسما را با استفاده از رابطه‌ی (۴) محاسبه کرد.

شبیه‌سازی عددی چند ساختار از عملگرهای پلاسما و ارزیابی عملکرد ...

می‌توانیم بگوییم که پلاسما در یک سیکل شبه پایا کار می‌کند [۸]. این مسئله در مطالعات ما به خصوص مطالعات عددی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای مشکل‌گشا است و هزینه‌ها را تا حد زیادی پایین می‌آورد. در عین حال صحت آن توسط روش‌های تجربی نیز تأیید شده است.

عملگر دائم و غیردائم

تفاوت بین حالت دائم و غیردائم عملگر پلاسما همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، عمدتاً به روش اعمال ولتاژ متناوب منبع تغذیه برمی‌گردد. بدین ترتیب که در عملگر دائم یک شکل مشخصی از ولتاژ به‌طور پیوسته تا انتها تکرار می‌شود، اما در حالت غیردائم، این موج ولتاژ در یک زمان مشخص تکرار می‌شود و سیستم روشن می‌باشد و در بخشی دیگر که قابل کنترل است، این موج خاموش است [۹].



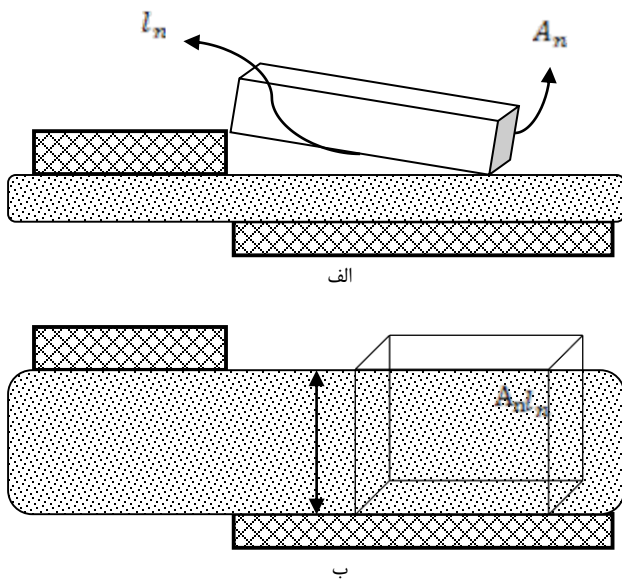
شکل ۵- شماتیک ولتاژ اعمالی در عملگرهای دائم و غیردائم [۹]

روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی

در تحقیق حاضر برای مدل کردن عملگر پلاسما از مدل الکترواستاتیک به‌همراه مدل مدار تجمعی استفاده شده است. مدل الکترواستاتیک یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین تئوری‌های شبیه‌سازی عددی می‌باشد که در حقیقت مبنای کارهای عددی در این زمینه محسوب می‌شود. معادله‌ی اصلی برای مدل کردن عملگر پلاسما طبق رابطه‌ی (۱) می‌باشد.

$$\nabla(\epsilon \nabla \phi) = -\frac{1}{\lambda_d^2} \phi \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۵)، K ضریبی ثابت است. این ضریب در زمانی که هنوز پلاسما تشکیل نشده است، صفر و در لحظاتی که پلاسما تشکیل شود، مقدار یک برای آن در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ سطح دی‌الکترونیک را در لحظه‌ی شروع به کار عملگر نشان می‌دهد. مقاومت الکتریکی هوا، ظرفیت خازنی دی‌الکترونیک و ظرفیت خازنی هوا را نشان می‌دهد. در ضمن یادآوری این نکته ضروری است که زیرنویس n به این معناست که هر کدام از این پارامترها برای المان‌های در نظر گرفته شده با توجه به شکل (۷) تعریف می‌شوند. پارامترهای A_n و l_n برای مقاومت الکتریکی هوا و ظرفیت خازنی هوا، با توجه به شکل (۸)-الف و همین پارامترها برای ظرفیت خازنی دی‌الکترونیک با توجه به شکل (۸)-ب قابل محاسبه می‌باشند.

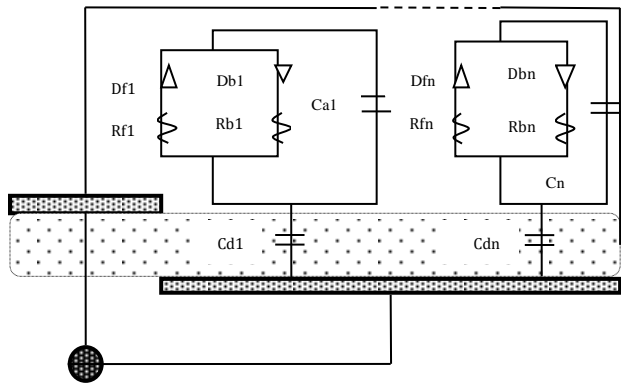


شکل ۸- پارامترهای محاسباتی رابطه‌ی (۵) الف- C_{a_n} و ب- R_n - C_{d_n}

روش مدارتجمعی در واقع یک مکمل و یک تقویت‌کننده برای روش الکترواستاتیک است. در روش الکترواستاتیک پتانسیل الکتریکی روی سطح دی‌الکترونیک به صورت یک عدد ثابت داده می‌شود، حال به کمک روش مدل مدارتجمعی، می‌توانیم شرایط مرزی را به‌طور واقع‌بینانه‌ای اصلاح نماییم. بنابراین روش مدل مدارتجمعی به وسیله‌ی رابطه‌ی (۵) شرایط مرزی مناسب برای مدل

$$\vec{f}_b = \rho_c \times \vec{E} = -\frac{\epsilon_0}{\lambda_d^2} \phi \vec{E} \quad (4)$$

مدل مکانی-زمانی مدارتجمعی [۱۰] برای تشریح و توضیح فرآیند یونیزاسیون گردآوری شده است. مزیت مهم این روش که آن را از تمام روش‌های عددی دیگر متمایز می‌سازد، عدم نیاز به کالیبراسیون‌های تجربی در مدل می‌باشد. در این مدل فرض اساسی این است که مولکول‌های هوا و دی‌الکترونیک، به صورت شبکه‌ای از مقاومت و خازن عمل می‌کنند. در مدل مکانی-زمانی مدارتجمعی، طول دی‌الکترونیک به تعداد بسیار زیادی از خازن‌ها و مقاومت‌ها تقسیم می‌شود و مانند شکل (۷) تعداد زیادی از مدارهای خازن-مقاومت بررسی می‌شوند.



شکل ۷- پارامترهای مدل مدارتجمعی [۱۰]

مدل‌سازی یونیزاسیون روی سطح دی‌الکترونیک طبق شکل ۷ و با استفاده از معادله دیفرانسیل (۵) صورت می‌پذیرد. پس از حل معادله دیفرانسیل (۵) به روش رانج-کوتا، ولتاژ روی هر قسمت از دی‌الکترونیک به دست می‌آید.

$$\frac{dV_n(t)}{dt} = \frac{dV_{app}(t)}{dt} \left(\frac{C_{a_n}}{C_{a_n} + C_{d_n}} \right) + K \frac{1}{R_n} * (V_{app}(t) - V_n(t))$$

$$V_n(0) = 0.0 \quad (5)$$

$$C_{a_n} = \frac{\epsilon_a \epsilon_o A_n}{l_n}, \quad C_{d_n} = \frac{\epsilon_d \epsilon_o A_n}{l_n}, \quad R_n = \frac{l_n \rho_a}{A_n}$$

$$Duty\ Cycle = \frac{T_{signal}}{T_{control}} \times 100 \quad (۸)$$

اعتبارسنجی روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی^۱
برای این که بتوان تشخیص داد که قسمت نتایج این مقاله چقدر معتبر بوده و می توان برای پژوهش های بعدی به آن استناد کرد، لازم است که نشان داده شود نتایج روش عددی استفاده شده در این مقاله تا چه میزان به نتایج تجربی نزدیک می باشد. قسمت اعتبارسنجی در سه بخش ارائه می شود؛ در بخش اول یک عملگر پلاسمای سه تکه ای مورد بررسی قرار می گیرد و سرعت القایی تولید شده توسط روش عددی الکترواستاتیک مدار تجمعی با نتایج تجربی مقایسه می شود. بخش دوم به بررسی جریان الکتریکی عبورکننده از پلاسمای برای یک عملگر یک تکه ای می پردازد و در انتها نشان داده می شود که روش عددی ارائه شده در این مقاله برای حل جریان، با نتایج تجربی در حالت خاموش عملگر پلاسمای هم خوانی خوبی دارد.

نیروی پیشران حجمی تولید شده توسط عملگرهای پلاسمایی و نیز سرعت القایی آن ها و همچنین جریان الکتریکی عبوری از پلاسمای سه پارامتر مهمی هستند که معمولاً برای بررسی و مطالعه پیرامون کارکرد عملگرهای پلاسمای بیشتر از سایر پارامترها مورد توجه محققان در مطالعات تجربی و عددی قرار گرفته است. در بخش اعتبارسنجی این مقاله نیز تلاش شده است تا با مقایسه ای این سه پارامتر به دست آمده توسط روش های عددی و مطالعات تجربی، اقدام به اعتبارسنجی دقیقی از روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی صورت گیرد.

اعتبارسنجی عملگر پلاسمای سه تکه ای

همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، هر کدام از تکه های الکتروود پنهان باعث ایجاد پلاسمای و شتاب دهی ذرات یونیزه شده ای هوا می شوند و این بدان معناست که به جای یک بار، سه بار جریان هوا شتاب داده می شود و دقیقاً به همین علت می باشد که در انتهای الکتروود سوم، شاهد جریانی با سرعت بیشتر نسبت به جریان القایی عملگر یک تکه ای هستیم.

شبه سازی عددی چند ساختار از عملگرهای پلاسمای و ارزیابی عملکرد ...

الکترواستاتیک فراهم می کند و هر دو باید با هم استفاده شوند.

پس از ارائه ای روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی برای عملگر پلاسمای با الکتروود پنهان یک تکه ای باید توضیح داد که این روش برای عملگر سه تکه ای با همان الگوی توضیح داده شده است؛ با این تفاوت که چون هر کدام از سه تکه ای الکتروود پنهان دارای طول و ارتفاع از سطح دی الکتریک متفاوت هستند، پس پارامترهای مقاومت الکتریکی هوا، ظرفیت خازنی هوا و دی الکتریک (با توجه به روابط (۵)) برای هر کدام از تکه های الکتروود پنهان و در نتیجه معادله ای اساسی مدار تجمعی برای هر کدام از تکه ها متفاوت خواهد شد. تفاوت در معادله ای مدار تجمعی برای سه تکه به این معناست که معادله ای الکترواستاتیکی که روی سطح دی الکتریک باید حل شود، دارای سه شرط مرزی متفاوت خواهد بود. بدین ترتیب که پس از حل معادله ای الکترواستاتیک، سه میدان نیروی پلاسمای متفاوت با توجه به سه تکه ای الکتروود پنهان وجود خواهد داشت. این نکته نیز باید یادآوری شود که بقیه ای شرایط مرزی برای مدل یک تکه ای و سه تکه ای تفاوتی با هم نمی کنند.

همان طور که قبلاً گفته شد، در حالت دائم عملگر پلاسمای یک نوع موج مشخص به طور پیوسته و با یک فرکانس خاص تا به انتها تکرار می شود؛ اما در حالت غیردائم، در بخشی از یک زمان مشخص، این موج ولتاژ اعمال می شود و سیستم روشن است و در بخش دیگر که قابل کنترل است، این موج خاموش می شود. اگر زمان اعمال سیگنال به عملگر پلاسمای با T_{signal} و کل زمان یک موج شامل بخش روشن و خاموش که قابل کنترل است، با $T_{control}$ نشان داده شود، می توان سه پارامتر فرکانس تحریک (رابطه ای ۶)، فرکانس موج (رابطه ای ۷) و سیکل کاری (رابطه ای ۸) را برای حالت غیردائم تعریف کرد.

$$f_{excitation} = \frac{1}{T_{control}} \quad (۶)$$

$$freq = \frac{1}{T_{signal}} \quad (۷)$$

عملگر پلازما ثبت شود. الکترودها در این آزمایش از جنس مس بوده و ضخامت آن‌ها ۷۶ میکرومتر می‌باشد. جنس دی-الکتریک هم کیتون با ضریب گذردهی الکتریکی ۴/۵ در نظر گرفته شده است.

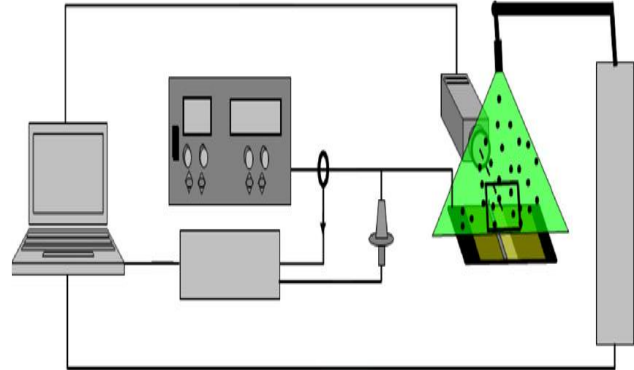
جدول (۲) شامل نمونه‌ای از آزمایش‌های انجام شده به همراه سرعت القایی تجربی به دست آمده توسط مرجع [۶] و نیز روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی (EEL) می‌باشد که با مقایسه‌ی آن‌ها می‌توان میزان خطای روش عددی نسبت به روش تجربی را محاسبه نمود. لازم به ذکر است که متوسط این خطا برابر با ۱۰/۵ درصد می‌باشد.

مرجع [۶] علاوه بر انجام آزمایش‌های تجربی با دستگاه سرعت‌سنج PIV، یک روش عددی موسوم به روش پاسخ‌گویی سطح^۲ (RSM) را نیز معرفی می‌کند که سرعت القا شده توسط عملگر پلازما را به کمک رابطه‌ی (۹) به دست می‌آورد.

$$F = Velocity = b_0 + \sum_j b_j x_j + \sum_{i,j} b_{i,j} x_i x_j \quad (9)$$

که در رابطه‌ی فوق x_i و x_j پارامترهای طراحی می‌باشند که همان d, w (ارجاع به شکل (۴)) و نیز ولتاژ و فرکانس موج مربوط به منبع ولتاژ متناوب می‌باشد. b نیز پارامتری است که وابسته به روابط تجربی می‌باشد.

در مرجع [۶] بستر تجربی انجام آزمایش توسط یک دستگاه PIV فراهم می‌شود و حرکت ذرات یونیزه‌شده‌ی هوا توسط لیزر آشکارسازی شده و به وسیله‌ی دوربین به کامپیوتر منتقل شده و ثبت می‌شود. بستر انجام آزمایش توسط شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- دستگاه PIV برای ثبت سرعت ذرات یونیزه‌شده‌ی هوا [۶]

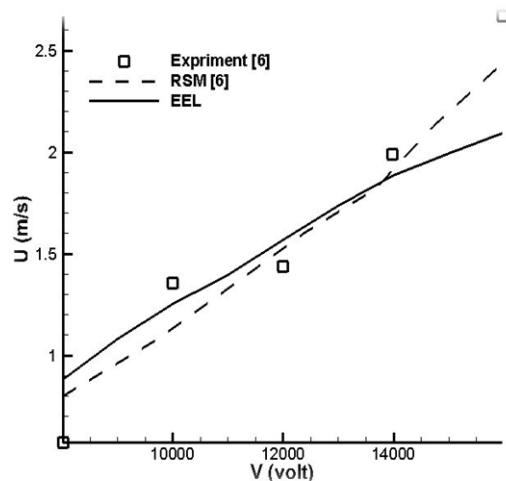
در این آزمایش ساختارهای مختلفی برای عملگر پلازما در نظر گرفته شده و تلاش شده است تا با مقادیر مختلفی که برای عرض و فاصله‌ی هر تکه از الکترودها پنهان (d) و w با توجه به شکل (۴) در نظر گرفته می‌شود، برای بازه‌های متفاوتی از ولتاژ و فرکانس موج، سرعت القا شده توسط

جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج عددی حاضر و تجربی مرجع [۶] سرعت القایی عملگر پلازما

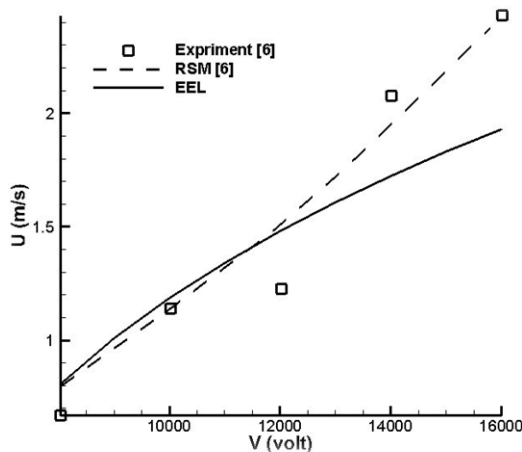
| سرعت القایی (m/s) EEL | سرعت القایی [۶] (m/s) | w3 (mm) | w1 (mm) | d3 (μm) | d2 (μm) | d1 (μm) | فرکانس (کیلوهرتز) | ولتاژ (کیلوولت) |
|-----------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------|-----------------|
| ۲/۳۵ | ۲/۲۸ | ۱۰ | ۲۰ | ۳۶۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۲/۳۷ | ۲/۳۲ | ۵ | ۴۰ | ۱۸۰ | ۳۶۰ | ۵۴۰ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۱/۲ | ۱/۴۴ | ۴۰ | ۵ | ۵۴۰ | ۳۶۰ | ۱۸۰ | ۱۰ | ۱۲ |
| ۲ | ۱/۹۱ | ۴۰ | ۵ | ۱۸۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۱/۰۶ | ۱/۲۷ | ۵ | ۴۰ | ۵۴۰ | ۳۶۰ | ۱۸۰ | ۲۰ | ۱۲ |
| ۰/۹ | ۰/۸۲ | ۴۰ | ۵ | ۵۴۰ | ۳۶۰ | ۳۶۰ | ۱ | ۱۲ |
| ۱/۲۴ | ۱/۵۸ | ۲۰ | ۱۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۱۸۰ | ۲۰ | ۱۲ |
| ۲ | ۱/۸۷ | ۲۰ | ۱۰ | ۱۸۰ | ۱۸۰ | ۵۴۰ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۱/۵۳ | ۱/۷۱ | ۴۰ | ۵ | ۵۴۰ | ۳۶۰ | ۱۸۰ | ۱۰ | ۱۴ |
| ۲/۳۵ | ۲/۴۳ | ۵ | ۴۰ | ۱۸۰ | ۱۸۰ | ۵۴۰ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۰/۶۶ | ۰/۵۲ | ۵ | ۴۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۱۸۰ | ۱ | ۱۲ |
| ۱/۹۳ | ۲/۰۱ | ۴۰ | ۵ | ۱۸۰ | ۳۶۰ | ۵۴۰ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۱/۵۱ | ۱/۳۷ | ۱۰ | ۲۰ | ۱۸۰ | ۵۴۰ | ۵۴۰ | ۱۰ | ۱۲ |

خصوص در ولتاژهای پایین‌تر، از دقت خوبی برخوردار می‌باشد.

شکل (۱۲) نیز نحوه‌ی تأثیر تغییرات ولتاژ متناوب را بر سرعت القاشده توسط عملگر پلازما برای شکل (۱۰) - ب نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی موجود در مرجع [۶] با نتایج روش عددی استفاده شده در کار حاضر (الکترواستاتیک- مدار تجمعی) مشاهده می‌شود که استفاده از روش عددی EEL در تمامی بازه‌های ولتاژ تقریباً از دقت خوبی برخوردار است.



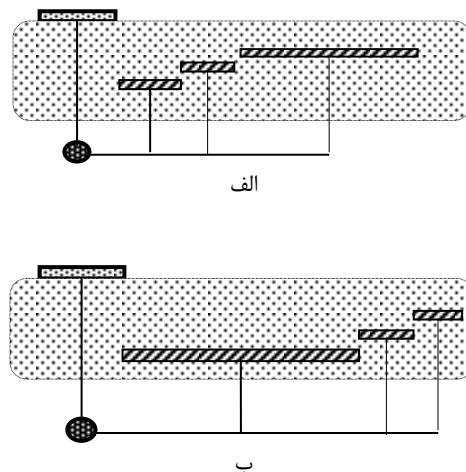
شکل ۱۱- تغییرات سرعت القایی به وسیله‌ی تغییر در ولتاژ منبع متناوب برای شکل ۱۰- الف به کمک روش‌های مختلف



شکل ۱۲- تغییرات سرعت القایی با تغییر در ولتاژ منبع متناوب برای شکل ۱۰- ب

شبیه‌سازی عددی چند ساختار از عملگرهای پلازما و ارزیابی عملکرد ...

در مرجع [۶] علاوه بر به‌دست آوردن سرعت القایی عملگر پلازما توسط آزمایش‌های تجربی که به‌صورت جداول (۱) و (۲) مشاهده شد، سعی شده است تا با ارائه‌ی روش عددی RSM برای دو ساختار عملگر پلازما نحوه‌ی تأثیر تغییرات ولتاژ متناوب را بر سرعت القاشده توسط عملگر پلازما نیز بررسی کند. دو ساختار از عملگر پلازما که بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته است، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰- ساختارهای تکه‌ای عملگر پلازما [۶]

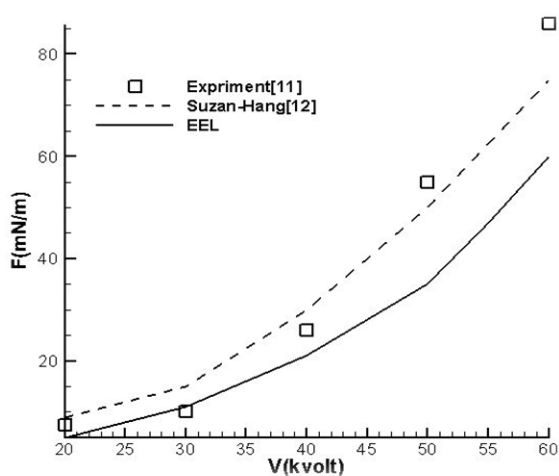
اطلاعات مربوط به عرض هر تکه از الکترودهای پنهان (W) و فاصله از سطح دی‌الکتریک (d) در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- مشخصات ابعاد عملگر پلازما [۶] شکل ۸

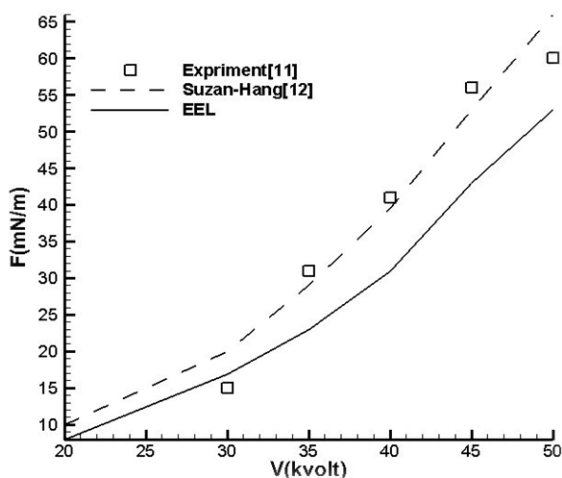
| | w3 (mm) | w1 (mm) | d3 (μm) | d2 (μm) | d1 (μm) | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| الف | ۴۰ | ۵ | ۱۸۰ | ۳۶۰ | ۵۴۰ | |
| ب | ۵ | ۴۰ | ۱۸۰ | ۳۶۰ | ۵۴۰ | |

شکل (۱۱) نحوه‌ی تأثیر تغییرات ولتاژ متناوب را بر سرعت القاشده توسط عملگر پلازما برای شکل (۱۰) - الف نشان می‌دهد. این شکل با مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی موجود در مرجع [۶] با نتایج روش عددی استفاده شده در کار حاضر (الکترواستاتیک- مدار تجمعی) نشان می‌دهد که استفاده از روش عددی الکترواستاتیک- مدار تجمعی به

افزایش نیروی پلازما با افزایش ولتاژ پیک برای سه روش تجربی، روش سوزان و هانگ و روش عددی الکترواستاتیک - مدار تجمعی با الگویی مشابه انجام می پذیرد. در نمودار شکل (۱۴) اثرات تغییر ولتاژ اعمالی بر نیروی پیشران در فرکانس چهار کیلوهرتز نشان داده شده است. در این نمودار توافق و همراهی خوبی بین روش سوزان و هانگ با نتایج تجربی مشاهده می شود.



شکل ۱۳- نیروی تولید شده توسط پلازما در ولتاژهای متفاوت و فرکانس دو کیلوهرتز با روش های تجربی، عددی سوزان-هانگ و الکترواستاتیک - مدار تجمعی



شکل ۱۴- نیروی تولید شده توسط پلازما در ولتاژهای متفاوت و فرکانس چهار کیلوهرتز

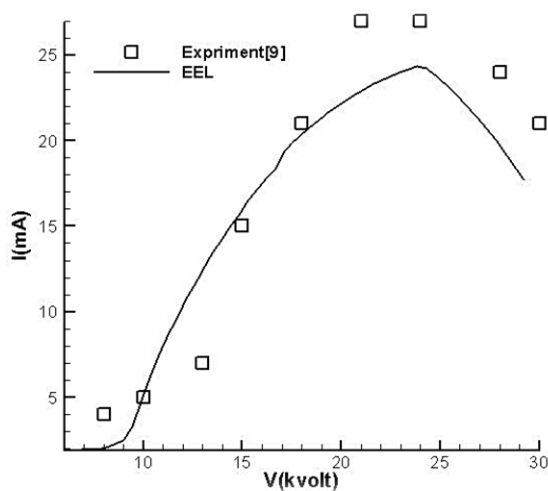
نکته‌ی دیگری که با توجه به نتایج تجربی برای شکل - های (۱۰) - الف و ب مشاهده می شود، این است که در شرایط یکسان از ولتاژ و فرکانس، سرعت القاشده توسط عملگر شکل الف از سرعت القاشده‌ی شکل ب بیشتر است. دلیل این امر این است که هر کدام از تکه‌های الکتروود پنهان، میدانی از نیرو را ایجاد می کنند که بزرگترین بردار آن در همان ابتدای الکتروود نمایان می شود و این میدان نیرویی با نرخی شدید، در همان ابتدا ضعیف شده و از بین می رود و می توان گفت که در یک پنجم ابتدای الکتروود پنهان این میدان نیرویی ناپدید می گردد. از طرفی، هرچه نقطه‌ی شروع هر تکه از الکتروود پنهان به لبه‌ی الکتروود آشکار نزدیکتر باشد، طبق معادلات رابطه‌ی (۵) ولتاژ جداره‌ی دی الکترونیک قوی تری تولید خواهد شد و پس از حل معادله‌ی الکترواستاتیک میدان نیرویی به - دست آمده توسط آن تکه قوی تر خواهد شد. بنابراین برای تکه‌ی دوم، هرچه طول تکه‌ی اول کوتاه تر و برای تکه‌ی سوم، هرچه مجموع طول های تکه‌های اول و دوم کمتر باشد، میدان نیرویی آن تکه قوی تر خواهد بود.

اعتبارسنجی عملگر پلاسمای یک تکه‌ای دائم

بخش دوم قسمت اعتبارسنجی، مربوط به مقایسه‌ی نیروی پیشران حجمی تولید شده توسط عملگر پلازما که در مرجع [۱۱] به آن اشاره شده است، با نتایج حل عددی به دو روش الکترواستاتیک - مدار تجمعی و روش سوزان و هانگ [۱۲] می باشد. مشخصات عملگر پلازما در [۱۱] به این صورت است که طول الکتروود پنهان و آشکار به اندازه‌ی یک سانتی متر بوده، دی الکترونیک به ضخامت ۱۲۷ میلی متر از جنس کپتون دو الکتروود را از یکدیگر جدا می کند و بین دو الکتروود نیز ۰/۵ سانتی متر فاصله در نظر گرفته می شود. در این آزمایش، الکتروود پنهان به زمین متصل است و الکتروود آشکار به یک منبع تولید ولتاژ با شکل موج سینوسی با ولتاژ ۵ کیلوولت و فرکانس ۴/۵ کیلوهرتز متصل می باشد.

در نمودار شکل (۱۳) اثرات تغییر حداکثر ولتاژ پیک تا پیک اعمالی بر نیروی پیشران در فرکانس دو کیلوهرتز نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در ولتاژهای پایین دقت روش عددی الکترواستاتیک بسیار خوب بوده و هر چند با افزایش ولتاژ پیک نتایج از هم فاصله می گیرند، روند

پنهان در دی‌الکتریک نیز برابر با سه سانتی‌متر است. پهنای این الکترودها که در راستای منظر بال قرار می‌گیرند، به اندازه‌ی ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. برای جلوگیری از تماس الکترودها چهار لایه دی‌الکتریک از جنس کپتون که هر کدام ضخامتی برابر با ۵۰ میکرومتر دارند، استفاده شده است. نمودار شکل (۱۵) تغییرات جریان پلازما بر حسب حداکثر ولتاژ اعمالی (ولتاژ پیک تا پیک) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیب خط در نتایج تجربی مرجع [۹] در ولتاژهای کم، زیاد است و با افزایش ولتاژ به تدریج این شیب کاهش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه برسد. این نشان می‌دهد که افزایش ولتاژ ورودی، جریان عبوری از پلازما را همواره افزایش نمی‌دهد، بلکه یک مقدار بهینه‌ای برای ولتاژ وجود دارد.



شکل ۱۵- جریان الکتريکی عبورکننده از پلازما در ولتاژهای مختلف، فرکانس تحریک ۱۰۰۰ هرتز، فرکانس موج ۲۸ کیلوهرتز، سیکل کاری ۷۵ درصد

برای توضیح این‌که چرا با افزایش مداوم ولتاژ پیک تا پیک همواره جریان الکتريکی نیز افزایش نمی‌یابد، بلکه روند افزایش جریان رفته‌رفته کم شده تا این‌که به یک مقدار بیشینه می‌رسد، باید گفت که آن‌چه باعث جریان الکتريکی می‌شود، حرکت الکترون‌ها می‌باشد. الکترون‌ها از یونیزه شدن هوای روی سطح دی‌الکتريک (که در اثر اختلاف ولتاژ الکترودها آشکار و سطح دی‌الکتريک به‌وجود آمده است.) به وجود می‌

شبه‌سازی عددی چند ساختار از عملگرهای پلازما و ارزیابی عملکرد ...

علاوه بر این، با یک نگاه کلی بر نمودارهای (۱۳) و (۱۴) می‌توان دریافت با افزایش فرکانس، هم نتایج روش‌های عددی و تجربی به یکدیگر نزدیک می‌شوند و هم دو روش عددی الکترواستاتیک- مدارتجمعی و سوزان و هانگ به توافق و همراهی بهتری می‌رسند. همان‌طور که در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مشاهده شد، نتایج روش عددی سوزان و هانگ همراهی و تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که در این روش چند پارامتر وجود دارد که با استفاده از نتایج تجربی حاصل می‌شوند؛ در نتیجه استفاده از این پارامترها در روابط حل عددی باعث افزایش دقت این روش می‌شود. ولی در عین حال عیب این روش این است که اگر نتایج تجربی موجود نباشد، نمی‌توان از این روش استفاده کرد. اما برعکس روش سوزان و هانگ، روش الکترواستاتیک-مدارتجمعی به هیچ پارامتر تجربی وابسته نمی‌باشد. اگرچه این موضوع باعث پایین آمدن دقت این روش می‌شود، این مزیت را نیز در پی دارد که می‌توان از این روش حتی در زمینه‌هایی که کارهای تجربی انجام نشده نیز استفاده کرد.

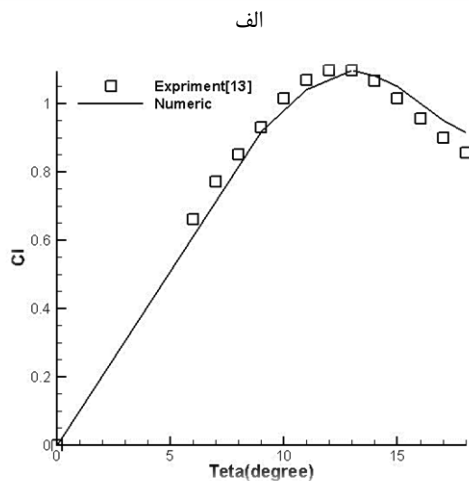
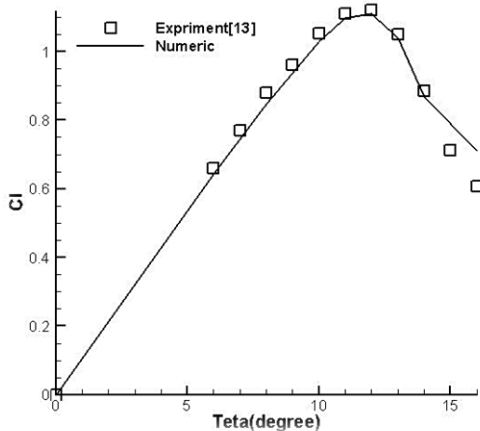
اعتبارسنجی عملگر پلازمای یک‌تکه‌ای غیردائم

بخش سوم قسمت اعتبارسنجی به مقایسه‌ی نتایج حل عددی روش الکترواستاتیک- مدارتجمعی با نتایج تجربی مرجع [۹] که حالت غیردائم عملگر پلازما را مورد بررسی قرار می‌دهد، می‌پردازد. همان‌طور که گفته شد، تفاوت بین حالت دائم و غیردائم عملگرهای پلازمایی عمدتاً به شکل اعمال ولتاژ بستگی دارد. در بخش دوم نیروی حجمی عملگر و در این بخش سرعت القاشده توسط این عملگرها با نتایج تجربی مقایسه می‌شود.

در روش عددی الکترواستاتیک- مدارتجمعی پس از این‌که ولتاژ روی سطح دی‌الکتريک به‌دست آمد، تفاضل ولتاژ سطح دی‌الکتريک و ولتاژ اعمالی تقسیم بر مقاومت پلازما، شدت جریان عبورکننده از پلازما را نشان می‌دهد.

عملگر پلازمایی که در مرجع [۹] از آن استفاده شده است، شامل دو الکترودها از جنس مس می‌باشد که ضخامت هر یک از آن‌ها ۵۰ میکرومتر است. طول الکترودها آشکار که در معرض جریان آزاد قرار دارد، یک سانتی‌متر و طول الکترودها

پاسخ گفت که نتایج به دست آمده در حالت پلاسما روشن چقدر می‌تواند معتبر باشد.



ب

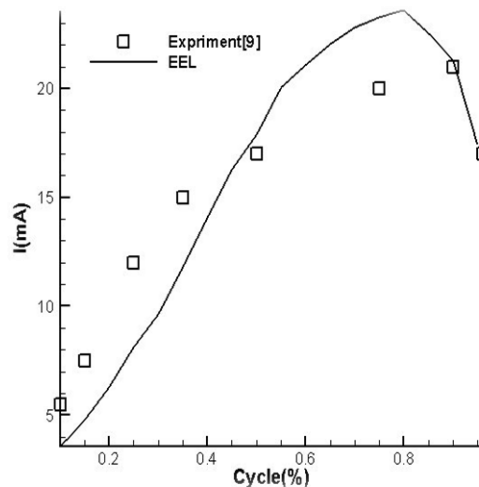
شکل ۱۷- مقایسه‌ی نمودار ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله‌ی ایرفویل برای دو حالت تجربی و عددی الف - NACA 0012 ب - NACA 0015

نتایج

این مقاله سه هدف خاص را دنبال می‌کند؛ اول این که عملگرهای پلاسمایی یک و سه تکه‌ای چگونه و تا چه میزانی باعث بهبود ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل‌های یاد شده می‌شوند؛ دوم این که این ساختار جدید از عملگرهای پلاسمایی چه میزان نسبت به ساختار استانداردشان مزیت و برتری دارند و این که اصولاً آیا می‌توان گفت استفاده از عملگر سه تکه‌ای بازدهی را نسبت به عملگر یک تکه‌ای بیشتر افزایش می‌دهد

آیند. اما نکته‌ی مهم در این قسمت این است که اختلاف ولتاژ تا حدودی توانایی یونیزه کردن هوا را دارد. زمانی که ظرفیت هوا برای یونیزه شدن تمام شود، دیگر افزایش اختلاف ولتاژ نمی‌تواند تعداد الکترون‌ها و در نتیجه جریان الکتریکی را افزایش دهد.

در نمودار شکل (۱۶) که تأثیر افزایش سیکل کاری را بر شدت جریان نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که این نمودار نیز مانند نمودار شکل (۱۴) دارای یک مقدار حداکثر می‌باشد. تقریباً در سیکل کاری ۹۰ درصد بیشترین مقدار الکترون بین الکتروود آشکار و سطح دی‌الکتریک حرکت می‌کند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات شدت جریان در هر دو تقریباً با یک الگو دنبال می‌شود.

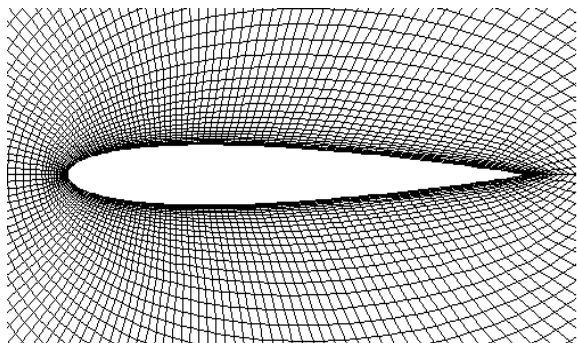


شکل ۱۶- جریان الکتریکی عبورکننده از پلاسما در سیکل‌های کاری مختلف، فرکانس تحریک ۱۰۰۰ هرتز، فرکانس موج ۲۸ کیلوهرتز، ولتاژ پیک تا پیک ۱۴ کیلوولت

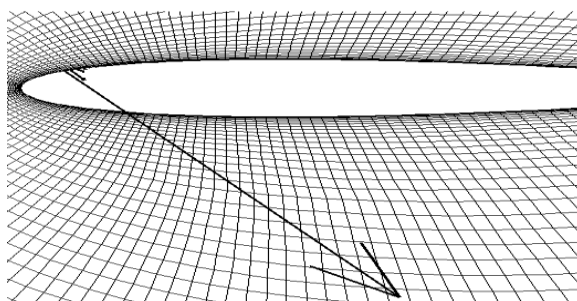
در شکل (۱۷) نمودار ضریب لیفت بر حسب زاویه‌ی حمله برای NACA 0012 و NACA 0015 در حالت‌های تجربی [۱۳] و عددی رسم شده است.

قبل از این که از عملگر پلاسمایی روی ایرفویل‌های NACA 0012 و NACA 0015 استفاده شود، باید روش عددی حل جریان استفاده شده در مقاله را با نتایج آزمایش‌های تجربی نیز اعتبارسنجی کرد تا در نهایت بعد از استفاده‌ی عملگرهای پلاسمایی روی ایرفویل‌های یاد شده به این سؤال

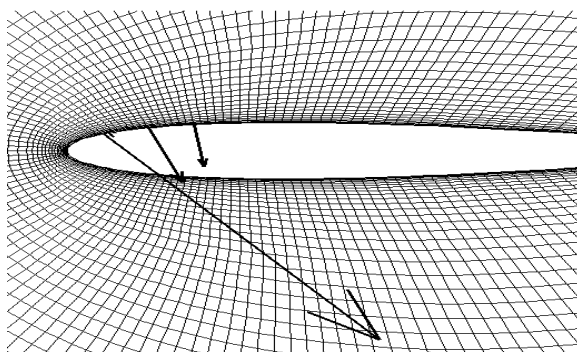
ایرفویل می‌باشند. مؤلفه‌ی عمودی، جریان را به سطح کشانده و مؤلفه‌ی مماسی نیز جریان را در امتداد سطح هدایت می‌کند.



الف



ب



ج

شکل ۱۸- بردارهای نیرویی پلاسما روی ایرفویل الف- بدون عملگر ب- با عملگر یک تکه‌ای ج- با عملگر سه تکه‌ای

شکل (۱۹) نمودار ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله را برای سه حالت بدون پلاسما، با پلاسما یک تکه‌ای و با پلاسما سه تکه‌ای رسم کرده است. دقت در مقادیر ضریب لیفت در زوایای حمله‌ی نزدیک به جدایش، تأثیر عملگر پلاسما را بهتر نشان می‌دهد.

شبه‌سازی عددی چند ساختار از عملگرهای پلاسما و ارزیابی عملکرد ...

یا خیر و در نهایت این که عملگرهای پلاسمایی روی ایرفویل- های متقارن ضخیم (NACA 0015) بهتر عمل می‌کنند یا روی ایرفویل‌های متقارن نازک (NACA 0012).

برای بررسی این که به چه میزان عملگر پلاسمایی در ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل NACA0012 تأثیر می‌گذارد، یک ایرفویل NACA 0012 در سه حالت بدون عملگر پلاسما، با عملگر یک تکه‌ای و با عملگر سه تکه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. عملگر پلاسمای مورد استفاده در این تحقیق چه در حالت یک تکه‌ای و چه در حالت سه تکه‌ای دارای منبع با ولتاژ متناوب سینوسی و با ولتاژ پیک تا پیک ۱۲۰۰۰ ولت و فرکانس موج ۱۰۰۰۰ هرتز می‌باشد و الکترودها به ضخامت ۵۰ میکرومتر و از جنس مس می‌باشند. مشخصات تکه‌های الکترودها پنهان در عملگر سه تکه‌ای نیز در جدول (۳)-الف آمده است. طول الکترودها پنهان در عملگر پلاسمای یک تکه‌ای برابر با ۵۰ میلی متر (که برابر با مجموع طول تکه‌های الکترودها پنهان است) می‌باشد. عملگر پلاسما در موقعیت $X/C = 0.14$ از لبه‌ی حمله‌ی ایرفویل قرار داده شده است، که طبق آزمایش‌های انجام شده در مرجع [۱۲] در زاویه‌ی ۱۴ درجه جدایش در حوالی این نقطه اتفاق می‌افتد. با توجه به مراجع [۱۴] و [۱۵] ضخامت پلاسمای ایجاد شده در حدود ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد.

شکل (۱۸) سه حالت را برای ایرفویل NACA 0012 نشان می‌دهد که قسمت الف حالتی است که عملگر پلاسما روی ایرفویل وجود ندارد؛ در قسمت ب از عملگر یک تکه‌ای روی ایرفویل استفاده شده است. بردارهای نیرویی پلاسما روی این شکل به خوبی بیانگر نحوه‌ی هدایت جریان توسط عملگر پلاسما و وادار کردن جریان به متصل ماندن و جدا نشدن از روی ایرفویل می‌باشد. نکته‌ی دیگری که از شکل (۱۱)- ب و ج باید متذکر شد، این است که بردار نیرویی بزرگتر دقیقاً در نزدیکترین نقطه‌ی الکترودها پنهان نسبت به الکترودها آشکار قرار دارد و با دور شدن از این نقطه، بردارهای نیرویی عملگر پلاسما نیز ضعیف تر می‌شوند.

شکل (۱۸)- ج نیز میدان نیرویی عملگر پلاسمایی که الکترودها پنهان آن سه تکه است را نشان می‌دهد. سه میدان نیرویی مجزا به خوبی در این شکل قابل مشاهده است. بردار- های نیرویی دارای دو مؤلفه‌ی مماسی و عمودی بر سطح

پلازما کاملاً جدا شده و گردابه‌های بزرگ و قوی را شکل داده است.

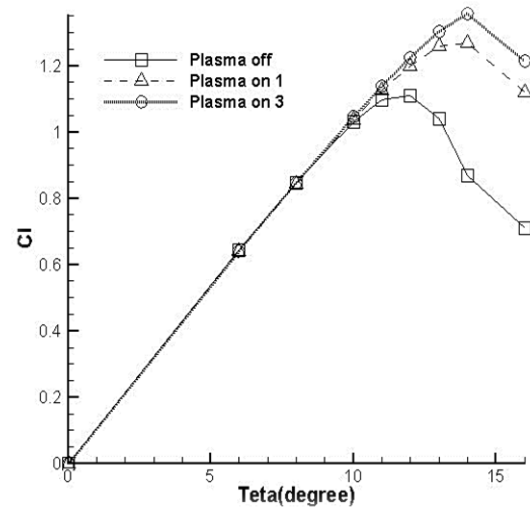
جدول ۴- مقایسه‌ی کمی مقادیر ضریب لیفت برای حالت‌های بدون پلازما و با پلازما و میزان بهبود ضریب لیفت برای زوایای حمله‌ی متفاوت ایرفویل NACA 0012

| زاویه حمله (درجه) | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۶ |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| بدون پلازما | ۱/۰۹۷ | ۱/۱۱ | ۱/۰۴ | ۰/۸۷ | ۰/۷۱ |
| پلاسمای یک تکه‌ای | ۱/۱۲۷ | ۱/۲ | ۱/۲۶ | ۱/۲۷ | ۱/۱۲ |
| درصد بهبود | ۲/۷ | ۸/۱ | ۲۱ | ۴۶ | ۵۸ |
| پلاسمای سه تکه‌ای | ۱/۱۳۹ | ۱/۲۲۴ | ۱/۳۰۴ | ۱/۳۵۸ | ۱/۲۱۵ |
| درصد بهبود | ۳/۸ | ۱۰/۲ | ۲۵ | ۵۶ | ۷۱ |

در شکل (۲۰) - ب ایرفویل دارای عملگر یک تکه‌ای می‌باشد. با این که جریان در این حالت از روی سطح ایرفویل جدا شده است، اما شکل گردابه‌های جریان نسبت به حالت بدون پلازما هموارتر بوده و گردابه‌های ضعیف‌تری را شاهد هستیم. در شکل (۲۰) - ج از عملگر پلاسمای سه تکه‌ای استفاده شده است و بار دیگر مشاهده می‌شود که گردابه‌ها نیز از حالت الف و ب کوچکتر و ضعیف‌تر می‌باشد.

شکل (۲۱) - الف توزیع ضریب فشار روی ایرفویل را برای زاویه‌ی ۱۲ درجه نشان می‌دهد. با این که در زاویه‌ی ۱۲ درجه هنوز واماندگی رخ نداده است، اما استفاده از عملگر پلازما سبب بهبود در توزیع ضریب فشار می‌شود. شکل (۲۱) - ب توزیع ضریب فشار روی ایرفویل برای زاویه ۱۴ درجه را که در آن سطح بال شاهد جدایش جریان است، نشان می‌دهد. تفاوت در دو حالت پلاسمای روشن و خاموش در این شکل به خوبی نشان داده شده است. هم حداقل ضریب فشار از عدد ۴/۵- به حدود عدد ۷/۵- رسیده است و هم نمودار ضریب فشار در حالت پلازما روشن نسبت به پلازما خاموش پهن‌تر شده است.

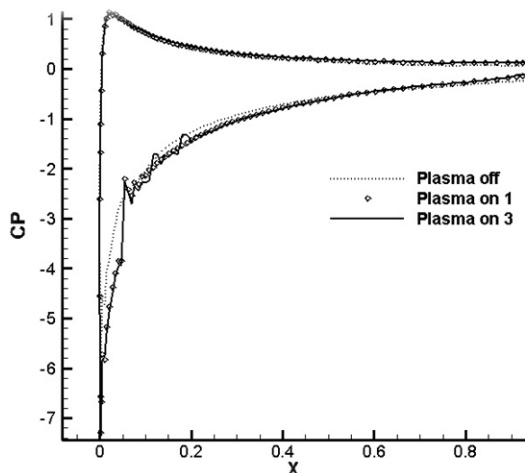
در زاویه حمله‌ی ۱۴ درجه که جریان از روی ایرفویل بدون پلازما جدا می‌شود، در حالت با پلاسمای یک تکه‌ای و سه تکه‌ای همچنان متصل به سطح ایرفویل باقی می‌ماند و نمودار ضریب لیفت را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. بهبود در نمودار ضریب لیفت در حالتی که از عملگر پلاسمای سه تکه‌ای استفاده شده نسبت به حالت عملگر یک تکه‌ای بیشتر می‌باشد.



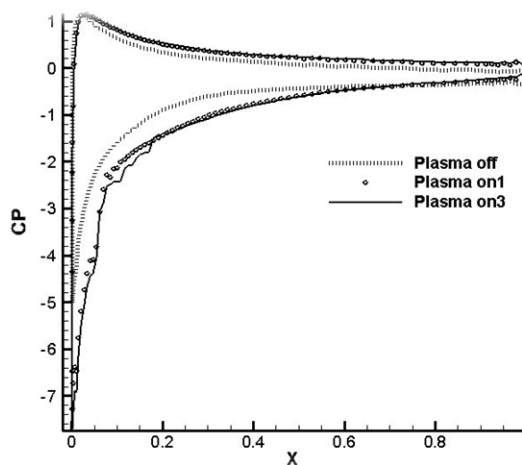
شکل ۱۹- نمودار ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله‌ی ایرفویل NACA 0012 برای سه حالت ایرفویل بدون پلازما، با پلاسمای یک تکه‌ای و با پلاسمای سه تکه‌ای

پس از رسم نمودار ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله و نمایش کیفی بهبود ضریب لیفت، نوبت به بررسی کمی بهبود ضریب لیفت می‌رسد. جدول (۴) مقادیر ضریب لیفت را برای حالت پلازما خاموش و پلازما روشن نشان می‌دهد و به صورت کمی میزان بهبود ضریب لیفت را بررسی می‌کند. شاید یکی از نتایج به تأخیر انداختن جدایش روی سطح ایرفویل و کنترل لایه مرزی به وسیله‌ی عملگرهای پلاسمایی این باشد که بدین وسیله شکل گردابه‌های روی سطح ایرفویل نیز دچار تغییر و دگرگونی می‌شود.

شکل (۲۰) شکل گردابه‌های جریان جدا شده از روی ایرفویل را در زاویه‌ی حمله‌ی ۱۶ درجه نشان می‌دهد. در قسمت الف مشاهده می‌شود که جریان از روی ایرفویل فاقد



الف

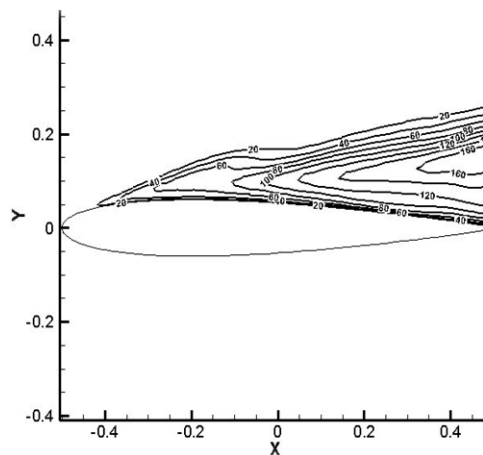


ب

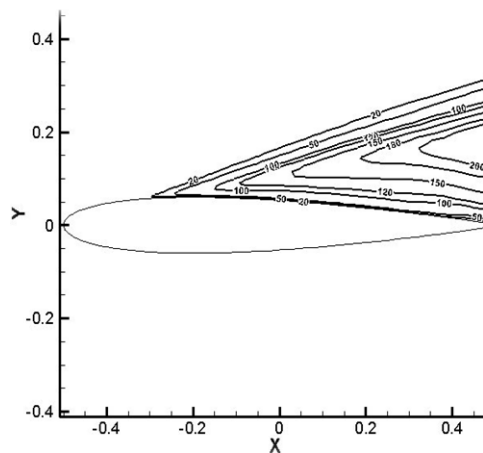
شکل ۲۱- نمودار توزیع ضریب فشار روی ایرفویل برای سه حالت ایرفویل بدون پلاسما، با پلاسمای یک تکه‌ای و با پلاسمای سه تکه‌ای الف-زاویه حمله‌ی ۱۲ درجه ب-زاویه حمله‌ی ۱۴ درجه

برای بررسی نقش عملگرهای پلاسمایی در کنترل جدایش و افزایش زاویه‌ی جدایش از ۱۲ به ۱۴ درجه بررسی نحوه‌ی تغییرات ضریب لیفت با افزایش زاویه‌ی حمله ضروری به نظر می‌رسد.

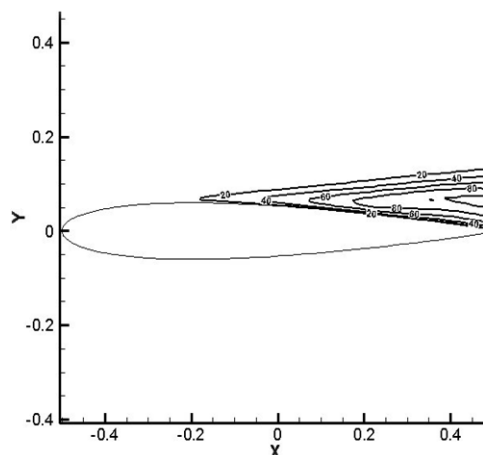
دو عامل در اندازه‌ی ضریب لیفت مؤثر می‌باشند؛ اول اختلاف فشار در نزدیکی لبه‌ی حمله است که هرچه بیشتر باشد، لیفت بیشتر خواهد بود. از این رو عاملی مثبت در افزایش ضریب لیفت به حساب می‌آید و دوم جدایش جریان است که هرچه جدایش به لبه‌ی حمله‌ی ایرفویل نزدیکتر باشد، سطح بیشتری از ایرفویل از تولید لیفت محروم بوده و



الف



ب

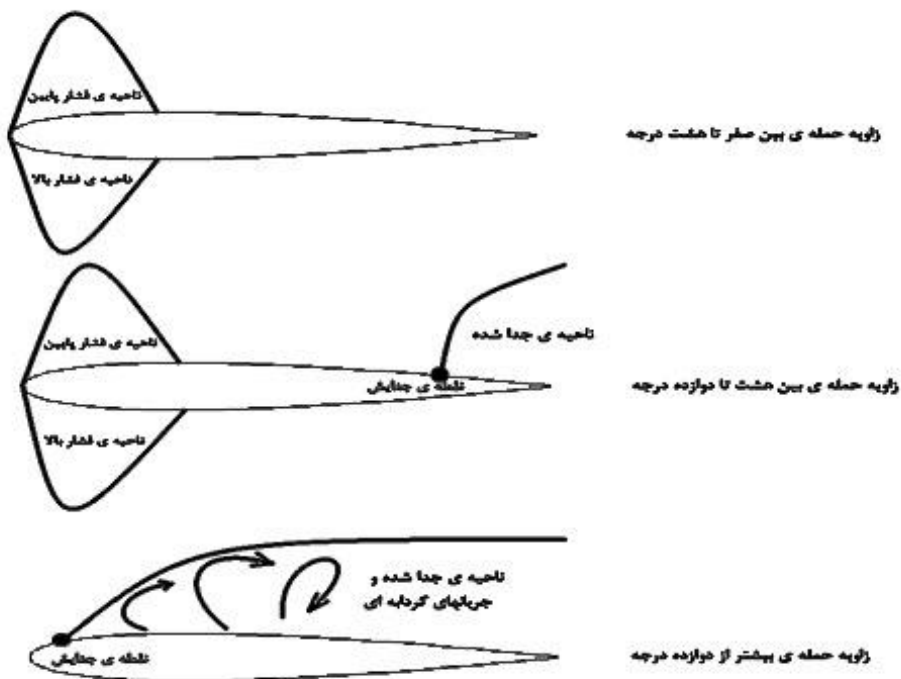
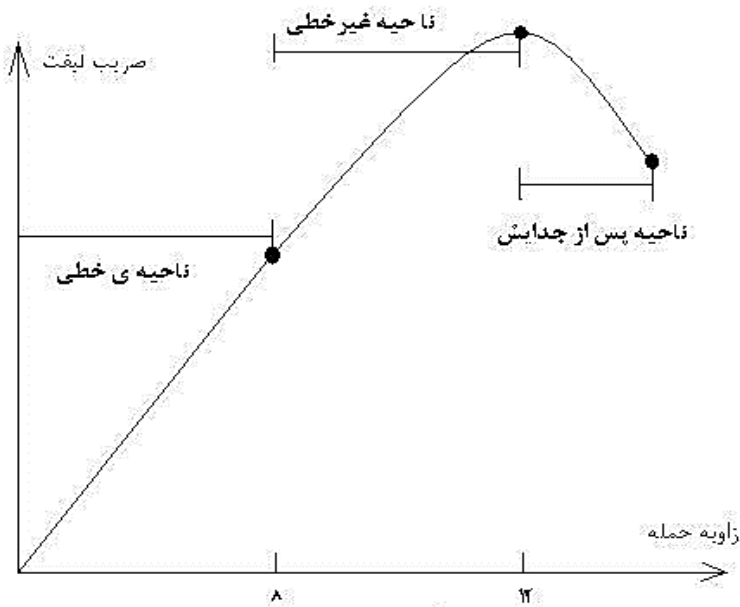


ج

شکل ۲۰- گردابه‌های ایجاد شده ناشی از جدایش روی ایرفویل الف-بدون پلاسما ب-با پلاسمای یک تکه‌ای ج-با پلاسمای سه تکه‌ای

بالا با افزایش فشار همراه خواهد بود. بدین سبب اختلاف فشار که عاملی مثبت می‌باشد، رو به افزایش می‌گذارد. همچنین از آنجایی که هیچ گونه جدایشی روی ایرفویل رخ نمی‌دهد، ضریب لیفت با افزایش زاویه حمله افزایش می‌یابد.

در نتیجه لیفت کاهش بیشتری می‌یابد. از این رو عاملی منفی در اندازه‌ی ضریب لیفت به حساب می‌آید. طبق شکل ۲۲ زمانی که زاویه‌ی حمله از صفر تا هشت درجه در حال افزایش است، ناحیه‌ی فشار پایین دچار کاهش فشار و ناحیه‌ی فشار



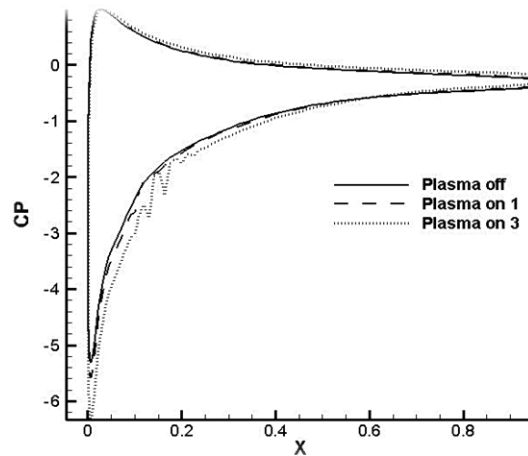
شکل ۲۲- نحوه‌ی نفوذ نقطه جدایش به داخل منطقه‌ی فشار پایین و تحت تأثیر قرار دادن ضریب لیفت

ایرفویل به تدریج جدا می‌شود و نقطه‌ی جدایش به سمت جلو منتقل شده و به لبه‌ی حمله نزدیک می‌شود. از طرف دیگر با افزایش زاویه‌ی حمله اختلاف فشار بین سطوح بالایی و پایینی در لبه‌ی حمله‌ی ایرفویل بیشتر می‌شود. وارد شدن نقطه‌ی جدایش به منطقه‌ی فشار پایین لبه‌ی حمله این اختلاف فشار زیاد را که باعث ایجاد لیفت زیاد شده است، از بین برده و لیفت (و به تبع آن ضریب لیفت) را به شدت کاهش می‌دهد. کاری که عملگر پلاسما انجام می‌دهد، این است که از نفوذ نقطه‌ی جدایش به این منطقه‌ی فشار پایین جلوگیری می‌کند؛ به این گونه باعث می‌شود ضریب لیفت همچنان بالا بماند، اما این هیچ‌گاه بدین معنی نیست که با حضور عملگر پلاسما روی سطح ایرفویل هیچ جدایشی روی ایرفویل وجود نخواهد داشت.

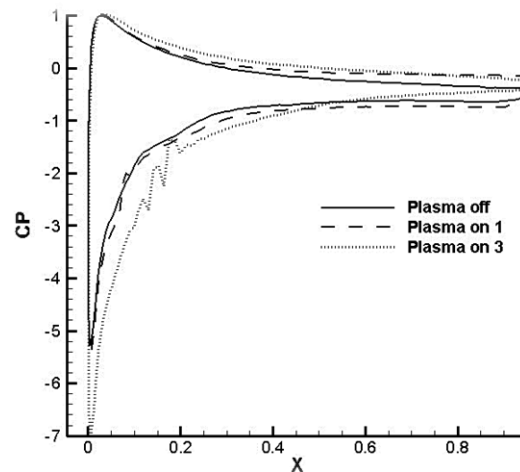
نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد عملگرهای پلاسمایی در ساختارهای مختلف به صورت عددی بررسی شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهند که استفاده از عملگرهای پلاسمایی در حالتی که جدایش جریان داشته باشیم، ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل را تا میزان قابل قبولی بهبود می‌بخشد. به نحوی که با به تأخیر انداختن جدایش (به عقب راندن نقطه‌ی جدایش از محل حداقل فشار نزدیک لبه‌ی حمله)، ضریب لیفت را برای ایرفویل NACA 0012 از زاویه حمله‌ی ۱۲ به ۱۴ درجه منتقل کرده و آن را تا ۴۶ درصد برای عملگر یک‌تکه‌ای و ۵۶ درصد برای عملگر سه‌تکه‌ای نسبت به مقدار پلاسما خاموش، افزایش می‌دهد. همچنین برای ایرفویل NACA 0015 از زاویه حمله‌ی ۱۳ به ۱۴ درجه برای عملگر یک‌تکه‌ای و از ۱۳ به ۱۵ درجه برای عملگر سه‌تکه‌ای منتقل کرده و آن را تا ۵/۶ درصد برای عملگر یک‌تکه‌ای و ۱۶/۵ درصد برای عملگر سه‌تکه‌ای نسبت به مقدار پلاسما خاموش، افزایش می‌دهد. با توجه به نکات گفته شده در بالا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از عملگرهای پلاسمایی در ایرفویل‌های متقارن نازک مؤثرتر از استفاده‌ی آن‌ها در ایرفویل‌های متقارن ضخیم می‌باشد. از طرفی بهبود در مقدار ضریب لیفت صرفاً مخصوص زمان جدایش وسیع جریان نیست، بلکه در زوایایی که ایرفویل

ریز و درشت می‌شود، کمتر شود و اختلاف فشار بین سطوح بالایی و پایینی که به واسطه‌ی افزایش زاویه حمله بیشتر شده است، باعث افزایش ضریب لیفت شده و نمودار توزیع ضریب فشار پهن‌تری را نسبت به دو حالت دیگر داشته باشد.



الف



ب

شکل ۲۴- نمودار توزیع ضریب فشار روی ایرفویل برای سه حالت ایرفویل بدون پلاسما، با پلاسمای یک‌تکه‌ای و با پلاسمای سه‌تکه‌ای الف-زاویه حمله‌ی ۱۴ درجه ب-زاویه حمله‌ی ۱۵ درجه

پس از ارائه‌ی نتایج، ذکر این نکته مهم است که عملگرهای پلاسمایی باعث انتقال نقطه‌ی جدایش به عقب می‌شوند. البته این امر بدین معنا نیست که این عملگرها جدایش روی بال را کاملاً از بین می‌برند. برای توضیح بیشتر باید گفت که با افزایش زاویه‌ی حمله، جریان سیال از انتهای

Mechanisms and responses of a single-dielectric barrier plasma actuator Geometric effects. *AIAA Journal*. Vol 42. 2004.

[2] Post, M, and Corke, T, Separation control using plasma actuators, *In Bulletin of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics*. Vol 47. 2006.

[3] Enloe, C, McLaughlin, T, VanDyken, R, and Fuscher, J, Plasma structure in the aerodynamic plasma actuator. *AIAA Journal*. Vol 42. 2004.

[4] Thomas, F. O, Kozlov, A, and Corke, T. C., Plasma Actuators for Bluff Body Flow Control. *AIAA Journal*, Vol. 44, 2006.

[5] Enloe, C., McLaughlin, T., Font, G., and Baughn, J. Parameterization of Temporal Structure in the Single Dielectric Barrier Aerodynamic Plasma Actuator. *AIAA Journal*. Vol. 44, 2006.

[6] Rasool Erfani a, Tohid Erfani b, Sergei V. Utyuzhnikov a, Konstantinos Kontis a, Optimisation of multiple encapsulated electrode plasma actuator, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 26, Issue 1, April-May 2013.

[7] Seth Walkera, Takehiko Segawaa, b, Mitigation of flow separation using DBD plasma actuators on airfoils: A tool for more efficient wind turbine operation an Energy Technology Research Institute, *Renewable Energy*. Vol 42, 2012.

[8] Orlove D.M., Characterization of Discharge Modes of Plasma Actuators, *AIAA Journal*, Vol 46, NO.12, Dec 2008.

[9] S.A. Sayyed-Shams Taleghani, A. Shadaram, and M. Mirzaei, Experimental Investigation of Active Flow Control for Changing Stall Angle of a NACA0012 Airfoil, Using Plasma-Actuator, *Fluid mechanic and aerodynamic periodical*, Vol. 1, No. 1, pp. 89-97, 2012. (In Persian)

[10] M. Pasandidefard, A. Sahaf, A Numerical Model for Modeling the Effect of Plasma Actuators in Flow control, *The 10th Iranian Aerospace Society Conference. Tehran*, 2011.

[11] Corke, T. C., Mertz, B., and Patel, M. P., Plasma Flow Control Optimized Airfoil, *AIAA Paper*, 2006-1208, 2006.

[12] M. Pasandidehfar, A. Sahaf, Studying and simulation of plasma actuators, *M.Sc Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 2011*. (In Persian)

[13] Robert E., Sheldahl, Paul C., Klimas, Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoils sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines, advanced energy projects division, 1981.

[14] Roth, J.R., Sherman, D.M., and Wilkinson, S.P., Boundary Layer Flow Control with a OneAtmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma, *AIAA Meeting Paper* 98-0328, p. 29, 1998.

[15] Jayaraman, B. and Shyy, W. , Modeling of Dielectric Barrier Discharge-Induced Fluid Dynamics

شبه‌سازی عددی چند ساختار از عملگرهای پلاسما و ارزیابی عملکرد ...

هنوز به حالت جدایش وسیع نرسیده است نیز عملگر پلاسما باعث بهبود در توزیع ضریب فشار (و تا حدودی ضریب لیفت) می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از عملگر پلاسما نه فقط برای زمان جدایش وسیع جریان بلکه قبل از آن نیز می‌تواند سودمند باشد. نکته‌ی مهمی که باید یادآوری شود، این است که منظور از جدایش وسیع در اینجا زمانی است که نقطه‌ی جدایش وارد منطقه‌ی فشار پایین نزدیک لبه‌ی حمله می‌شود.

نکته‌ی دیگری که به‌عنوان نتیجه می‌توان ذکر کرد، این است که استفاده از الکتروود پنهان سه‌تکه‌ای سبب بازیابی نیروی حجمی عملگر می‌شود و در واقع هر تکه از الکتروود پنهان به‌طور جداگانه سرعتی را به جریان آزاد سیال القا می‌کند و این مجموعه سبب می‌شود که این ساختار جدید نسبت به ساختار استاندارد با الکتروود پنهان یک‌تکه‌ای مزیت بیشتری داشته باشد و مجموعه ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل را بهبود بیشتری بخشد.

پی‌نوشت

- 1- ElectroEstatic-Lumpelement (EEL)
- 2- Response Surface Methodology (RSM)

فهرست علائم

| | |
|-----------------------------------|--------------|
| پتانسیل الکتریکی (ولت) | ϕ |
| شعاع دبابی پلاسما (میلی متر) | λ_d |
| چگالی پلاسما (کیلوگرم بر مترمکعب) | ρ_c |
| بردار میدان الکتریکی | \vec{E} |
| بردار نیروی حجمی (نیوتن بر متر) | \vec{f}_b |
| ولتاژ (ولت) | V |
| زمان (ثانیه) | t |
| ضریب گذردهی الکتریکی خلأ | ϵ_0 |
| ضریب گذردهی الکتریکی دی الکتریک | ϵ_d |
| ضریب گذردهی الکتریکی هوا | ϵ_a |
| مقاومت الکتریکی هوا (اهم متر) | ρ_a |

منابع و مآخذ

- [1] Enloe, L, McLaughlin, T, Van Dyken, Kachner, Jumper, E, Corke, T, Post, M, and Haddad,

and Heat Transfer, *J. Progress in Aerospace Sci.*, Vol. 44, No. 3, pp. 139-191, 2008.