

بررسی روشهای عددی مختلف شبیه سازی عملگر پلاسما برای حالت های دائم و غیردائم

محمود پسندیده فرد^۱، سعید میرزایی^۲

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک و هوافضا

چکیده

کنترل فعال جریان روی سطوح کنترلی از دیرباز مورد توجه مهندسان علم آیرودینامیک قرار داشته است. عملگرهای پلاسما از جمله ابزارهایی هستند که برای این منظور استفاده می شوند و در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. این عملگرهای پلاسمایی با توجه به شکل تولید موج متناوب می تواند در دو نوع دائم و غیردائم مورد استفاده قرار گیرند. برای شبیه سازی عددی عملگرهای پلاسما سه روش وجود دارد که در این مقاله از دو روش الکترواستاتیک-مدار تجمعی و روش سوزان و هانگ و در دو حالت دائم و غیردائم عملگر پلاسما استفاده شده است. نیروی پیشران حجمی تولید شده توسط این عملگرها که گاهی اوقات در غالب سرعت القایی شناخته می شود و نیز شدت جریان عبوری از پلاسما دو پارامتر مهمی هستند که معمولا برای بررسی و مطالعه پیرامون کارکرد عملگرهای پلاسما بیشتر از سایر پارامترها مورد توجه محققان در مطالعات تجربی و عددی قرار می گیرند. این مقاله نیز تلاش دارد تا با مقایسه ی این دو پارامتر بدست آمده توسط روشهای عددی و مطالعات تجربی، اقدام به اعتبارسنجی دقیقی از این روشهای عددی کند. نتایج این مقاله در دو قسمت ارائه می شود که قسمت اول شامل بررسی و مقایسه ی نیروی پیشران حجمی تولید شده توسط عملگر پلاسما که از روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی بدست آمده با نتایج روش عددی سوزان و هانگ و نیز نتایج تجربی برای حالت دائم عملگر پلاسما می باشد و قسمت دوم نتایج نیز به مقایسه ی جریان الکتریکی عبور کننده از پلاسما حاصل از روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی با نتایج مطالعات تجربی در حالت غیردائم عملگر پلاسما می پردازد.

واژه های کلیدی: کنترل فعال جریان - عملگر پلاسما - شبیه سازی عددی - الکترواستاتیک - مدار تجمعی - سوزان و هانگ

مقدمه

در دهه گذشته، عملگرهای دی الکتریک بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. کنترل جریان در گذشته بوسیله ی مکش، دمش و استفاده از شیار های آیرودینامیکی انجام می شد، اما امروزه از عملگرهای پلاسما استفاده می شود. این ابزار قادرند جریان را دستکاری کنند بدون آنکه نیاز به حرکت هیچ قسمتی از بال وجود داشته باشد. تحقیقات بسیاری نیز در زمینه ی عملگرهای پلاسما صورت گرفته است که هدف غالب آنها افزایش در نیروی پیشران عملگر پلاسما بوده است. تأثیر شکل ولتاژ متناوب و همچنین تأثیر جنس و ضریب گذردهی الکتریکی دی الکتریک در میزان نیروی پیشران تولید شده توسط عملگر پلاسما مورد بررسی قرار گرفته شده است. بخش عمده کارهای انجام گرفته در مورد عملگرهای پلاسما، در خصوص تعیین اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد و میزان نیروی پیشران و نیز بهینه سازی این پارامترها بوده است. یکی از پیش گامان مهم این عرصه انلول است که در [۱ و ۲] به همراه توماس اثر پارامترهای مختلفی از جمله: ولتاژ، فرکانس ورودی، جنس و ضخامت دی الکتریک را

۱ - دانشیار و عضو هیأت علمی دانشگاه

۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد، e.psm1985@gmail.com (نویسنده مخاطب)

بر نیروی پیشران عملگر بررسی کرد. انلول همچنین فهمید که تغییر شکل موج ولتاژ تغذیه در میزان نیروی پیشران موثر است. در آزمایش انلول در خصوص بررسی تأثیر شکل موج ولتاژ ورودی، از یک تابع دندانه اره ای استفاده شده بود. یک بار با هدف بیشینه کردن نیم سیکل اول و یک بار با هدف بیشینه کردن نیم سیکل دوم. او دریافت که در حالتی که تابع ورودی قسمت نیم سیکل اول بزرگتری داشته باشد، (در بیشتر زمان ها مقادیر ولتاژ مثبت باشد) عملگر بسیار با کیفیت تر خواهد بود و نیروی پیشران عملگر بیشتر می شود. توماس نیز در [۴] به بررسی اثر جنس و ضخامت دی الکتریک پرداخته است. او دریافت که هر قدر ضخامت دی الکتریک بالاتر باشد، می توان ولتاژ ورودی را تا مقادیر بیشتری زیاد کرد، بدون آن که از اشباع دی الکتریک نگران باشیم و لذا نیروی پیشران نیز افزایش می یابد. همچنین هر قدر ثابت دی الکتریک کمتر باشد، (در ولتاژ ثابت) نسبت به دی الکتریک با ثابت بالاتر نیروی پیشران بیشتری تولید می کند. ژاکوب در [۵] به بررسی و مقایسه سه هندسه ی مختلف پرداخت. هندسه اولی که در این رابطه بررسی شد، همان هندسه ی متداول خطی می باشد. نحوه قرارگیری الکتروود ها در این حالت در شکل (۱) دیده می شود. هنگامی که عملگر پلاسما کار می کند یک جت هوای مماسی در روی سطح ایرفویل ایجاد میگردد [۶] که به باد یونی^۱ معروف است (شکل (۲)). باد یونی تولید شده باعث کنترل جریان، کاهش درگ، کنترل جدایش و افزایش لیفت می گردد [۷].

اما شاید در این حوزه، مهمترین زمینه ای که پژوهشگران بر روی آن کار می کنند بعد از کارهای تجربی، ارائه و بسط روش های محاسبات عددی و شبیه سازی عددی عملگرهای پلاسما می باشد [۸]. اینگونه شبیه سازی ها در صورت اثبات صحت و راستی آزمایی، ضمن کاهش چشمگیر هزینه های تحقیق، امکانات جدیدی را برای پژوهشگران فراهم می آورد. تعویض پارامترهای ورودی به آسانی و با صرف کمترین وقت و هزینه به منظور بررسی موارد جدید، امکان دقیق شدن و بزرگنمایی قسمت خاصی از فضای حل، اخذ همه ی اطلاعات در مرحله دیدن نتایج از جمله محاسن مدل سازی عددی می باشد. در مطالعه ی پیش رو از دو مدل عددی عملگر پلاسما استفاده شده است. در مدل الکترواستاتیک_مدار تجمعی نیاز به هیچ پارامتر تجربی نمی باشد و نتایج آن صرفا مبتنی بر داده های عددی می باشد. اما در روش سوزان و هانگ از یک سری اطلاعات تجربی استفاده می شود و همانطور که در ادامه به آن اشاره خواهد شد، همین امر باعث می شود نتایج این روش به نتایج تجربی نزدیکتر شود. خروجی دو روش مذکور نیروهای پیشران حجمی پلاسما می باشد.

آرایش و پیکربندی عملگرهای پلاسما

عملگرهای دی الکتریک، آرایش و پیکربندی بسیار ساده ای دارند. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود، این نوع از عملگرها شامل دو

¹ Ionic Wind

تفاوت بین حالت دائم و غیردائم عملگر پلاسما همانطور که در شکل (۵) مشاهده میشود، عمدتاً به روش اعمال ولتاژ متناوب منبع تغذیه بر می گردد. شکل ولتاژ اعمالی در حالت دائم به این صورت می باشد که 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 پلاسما 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 ی (۱۰))، فرکانس موج (رابطه ی (۱۱)) و سیکل کاری (رابطه ی (۱۲)) را برای حالت غیردائم تعریف کرد.

فرمول ها و روابط

برای بدست آوردن ولتاژ روی سطح دی الکتریک به روش مدار تجمعی و با استفاده از یک کد فورترن معادله دیفرانسیل زیر را به روش رانج_کوتا حل میشود.

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

$$V_n(0) = 0.0 \quad (1)$$

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

معادله ی اساسی حاکم در روش الکترواستاتیک به صورت زیر می باشد:

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

روابط غلظت پلاسما و نیروی پلاسما در روش الکترواستاتیک:

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

$$f_b = \rho_c * E = -\frac{\epsilon_0}{\lambda_d} \phi E \quad (4)$$

رابطه ی شدت جریان عبوری از پلاسما در روش الکترواستاتیک- مدار تجمعی نیز به صورت زیر می باشد.

$$I_n(t) = [V_{app}(t) - V(t)] / R_n \quad (5)$$

معادلات سوزان و هانگ به صورت زیر می باشد:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi_{ext}) = 0.0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi_{plasma}) = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (7)$$

$$\rho_{c,w}(x,t) = \rho_c^{max} * G(x) * F(t) \quad (8)$$

$$f = E * \rho_c = \rho_c * (-\nabla \phi) \quad (9)$$

تعریف فرکانس تحریک و فرکانس موج و سیکل کاری در عملگر پلاسما غیردائم به صورت زیر می باشد:

$$f_{excitation} = \frac{1}{T_{control}} \quad (10)$$

$$freq = \frac{1}{T_{signal}} \quad (11)$$

$$DutyCycle = \frac{T_{signal}}{T_{control}} * 100 \quad (12)$$

نتایج

صفحه فلزی به عنوان الکتروود هستند که با آرایش خاصی در دو طرف یک ماده عایق دی الکتریک قرار گرفته اند. یکی از این الکتروودها که در معرض جریان هوا قرار داده شده است و به راحتی دیده می شود، الکتروود آشکار و الکتروود دیگر که در داخل ماده عایق پنهان شده است، الکتروود پنهان نام دارد. معمولاً الکتروودها را بلند و نازک انتخاب می کنند و به صورت طولی روی سطح آیرودینامیکی قرار می دهند. جنس دی الکتریک نیز اغلب، کپتون و یا تفلون است. عملگر پلاسما به هیچ وجه سطح زیادی در مقابل جریان ندارد و لذا قراردادن آن بر روی سطح آیرودینامیکی موجب بوجود آمدن مقاومت بیشتر از این لحاظ نمی شود.

روش های مدل سازی عددی

مدل عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی، از ترکیب روش مکانی-زمانی مدار تجمعی و روش الکترواستاتیک استفاده می کند.

مدل مکانی-زمانی مدار تجمعی [۹]، برای تشریح و توضیح فرآیند یونیزاسیون گردآوری شده است. مزیت مهم این روش که آن را از تمام روش های عددی دیگر متمایز می سازد عدم نیاز به کالیبراسیون های تجربی در مدل می باشد. در این مدل فرض اساسی این است که مولکول های هوا و دی الکتریک، به صورت شبکه ای از مقاومت و خازن عمل می کنند. درمدل مکانی زمانی مدار تجمعی، طول دی الکتریک به تعداد بسیار زیادی از خازن ها و مقاومت ها تقسیم می شود و مانند شکل (۳) تعداد زیادی از مدارهای خازن-مقاومت بررسی می شوند. مدل سازی یونیزاسیون روی سطح دی الکتریک با استفاده از معادله دیفرانسیل (۱) صورت می پذیرد. پس از حل معادله دیفرانسیل (۱) به روش رانج-کوتای مرتبه چهار، ولتاژ روی هر قسمت از دی-الکتریک بدست می آید. پس از بدست آمدن ولتاژ روی سطح دی الکتریک، با استفاده از روش الکترواستاتیک که معادله ی اساسی آن توسط رابطه ی (۲) بیان می شود، توزیع ولتاژ در فضای روی عملگر پلاسما، بدست می آید. در واقع می توان گفت روش مدار تجمعی شرایط مرزی مناسب برای مدل الکترواستاتیک را فراهم می کند و هر دو باید باهم استفاده شوند. دامنه ی حل معادله ی الکترواستاتیک در شکل (۴) آمده است. مقادیر پتانسیل الکتریکی در روی الکتروودها $\pm \phi_0$ می باشد و شرایط مرزی برای نقاط دوردست $\phi_{outer-boundry} = 0.0$ در نظر گرفته می شود.

پس از بدست آمدن پتانسیل الکتریکی، با استفاده از رابطه ی (۳) غلظت روی سطح دی الکتریک و با استفاده از رابطه ی (۴) نیروی حجمی ناشی از پلاسما بدست خواهد آمد. همچنین شدت جریان عبوری از پلاسما در این روش توسط رابطه ی (۵) نمایش داده شده است.

در مدل سوزان و هانگ، میدان پتانسیل الکتریکی ناشی از عملگر پلاسما به دو قسمت تقسیم می شود. قسمت اول پتانسیل الکتریکی ناشی از میدان الکتریکی خارجی می باشد که با حل رابطه ی (۶) و قسمت دوم ناشی از پلاسما می باشد و از حل رابطه ی (۷) بدست می آید. چگالی پلاسما در این روش با استفاده از رابطه ی (۸) حاصل می شود که پارامترهای $G(x)$ و ρ_c^{max} از داده های تجربی بدست می آیند و $F(t)$ نیز شکل تابع موج ولتاژ می باشد.

در روش سوزان و هانگ نیروی حجمی ناشی از پلاسما نیز توسط رابطه ی (۹) بدست می آید که در این رابطه E میدان الکتریکی می باشد.

عملگر پلاسما در حالت دائم و غیردائم

وجود دارد در حالی که شیب خط در حل عددی تقریباً یک مقدار ثابتی می باشد.

نمودار (۱۰) تاثیر افزایش فرکانس موج بر شدت جریان عبوری از پلاسما را نشان می دهد. مشاهده می شود که در فرکانس موج های کمتر از ۱۴ کیلوهرتز، همراهی خوبی بین نتایج تجربی مرجع [۱۱] و نتایج حل عددی وجود دارد، اما با افزایش بیشتر فرکانس موج، اختلاف بین نتایج تجربی و عددی نیز افزایش می یابد.

در نمودار (۱۱) که تاثیر افزایش سیکل کاری را بر شدت جریان نشان می دهد، مشاهده می شود که میزان اختلاف بین نتایج تجربی و عددی تقریباً ثابت است اما روند تغییرات شدت جریان در هر دو تقریباً با یک الگو دنبال می شود.

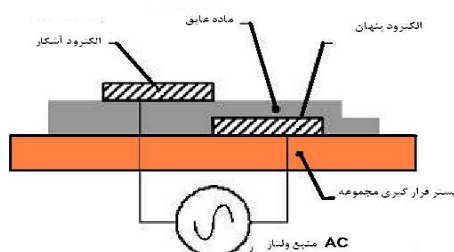
نتیجه گیری

همانطور که در قسمت نتایج مشاهده شد، نتایج روش عددی سوزان و هانگ (در قسمت دائم عملگر پلاسما) همراهی و تطابق بیشتری را با نتایج تجربی دارد. این موضوع می تواند به این دلیل باشد که در این روش چند پارامتر وجود دارد که این پارامترها با استفاده از نتایج تجربی حاصل می شوند، در نتیجه استفاده از این پارامترها در روابط حل عددی می تواند باعث افزایش دقت این روش شود. ولی در عین حال عیب این روش این است که اگر نتایج تجربی موجود نباشد نمی توان از این روش استفاده کرد.

در مورد روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی (در قسمت دائم عملگر پلاسما) مشاهده می شود که هرچه فرکانس افزایش می یابد نتایج این روش به نتایج روش سوزان و هانگ و نتایج تجربی نزدیکتر می شود، این بدان معناست که در فرکانس های بالا و (تا حدودی) در ولتاژهای کم میتوان از این روش عددی با دقت نسبتاً بالا استفاده کرد. اما در قسمت غیردائم عملگر، تنها در مقادیر پایین فرکانس موج، سیکل کاری و حداکثر ولتاژ، نتایج حل عددی به نتایج تجربی نزدیکتر می شود.

در ضمن یادآوری این نکته ضروری است که برعکس روش سوزان و هانگ، روش الکترواستاتیک-مدار تجمعی به هیچ پارامتر تجربی وابسته نمی باشد، اگرچه این موضوع باعث پایین آمدن دقت این روش می شود اما این مزیت را نیز در پی دارد که می توان از این روش حتی در زمینه هایی که کارهای تجربی نشده است، استفاده کرد.

شکل ها و نمودارها



شکل ۱: شماتیک یک عملگر پلاسما

قسمت اول، مربوط به مقایسه ی نیروی پیشران حجمی تولید شده توسط عملگر پلاسما که در مرجع [۱۰] به آن اشاره شده است، با نتایج حل عددی به دو روش الکترواستاتیک-مدار تجمعی و روش سوزان و هانگ می باشد. مشخصات عملگر پلاسما در [۱۰] به این صورت است که طول الکتروود پنهان و آشکار به اندازه ی یک سانتی متر، دی الکتریک 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 گپ 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 ۵۰۰۰ ولت و فرکانس ۴٫۵ کیلوهرتز متصل می باشد.

نمودار (۶) مقایسه ای از نیروی پیشران عملگر پلاسما در ولتاژهای مختلف و در فرکانس برابر یک کیلوهرتز می باشد. این نمودار نشان می دهد در ولتاژهای کمتر از ۲۰ کیلوولت توافق خوبی بین دو روش عددی و نتایج تجربی وجود دارد. این توافق نتایج، برای روش سوزان و هانگ و نتایج تجربی تا ولتاژهای حدود ۵۵ کیلوولت ادامه خواهد یافت، اما با افزایش بیشتر حداکثر ولتاژ، این اختلاف بیشتر می شود.

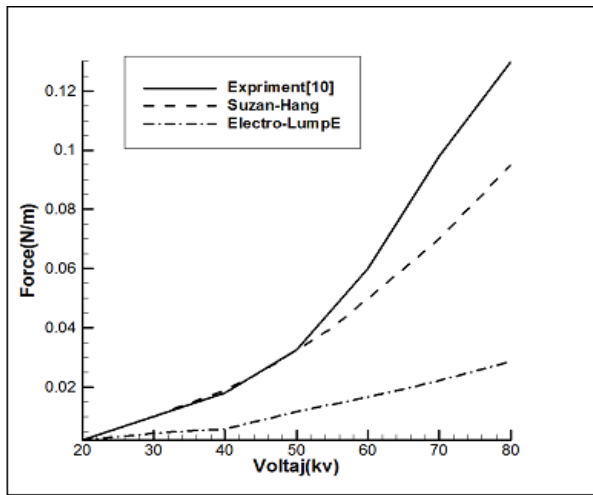
در نمودار (۷) اثرات تغییر حداکثر ولتاژ اعمالی بر نیروی پیشران در فرکانس دو کیلوهرتز نشان داده شده است. با مقایسه ی این نمودار با نمودار (۶)، مشاهده می شود که نتایج روش الکترواستاتیک به نتایج روش سوزان و هانگ نزدیکتر شده اما همچنان نتایج حل عددی سوزان و هانگ به نتایج تجربی نزدیکتر می باشد.

در نمودار (۸) 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. علاوه بر این، با یک نگاه کلی بر این سه نمودار یاد شده می توان دریافت، با افزایش فرکانس، هم نتایج روشهای عددی و تجربی به یکدیگر نزدیک می شوند و هم دو روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی و سوزان و هانگ به توافق و همراهی بهتری می رسند.

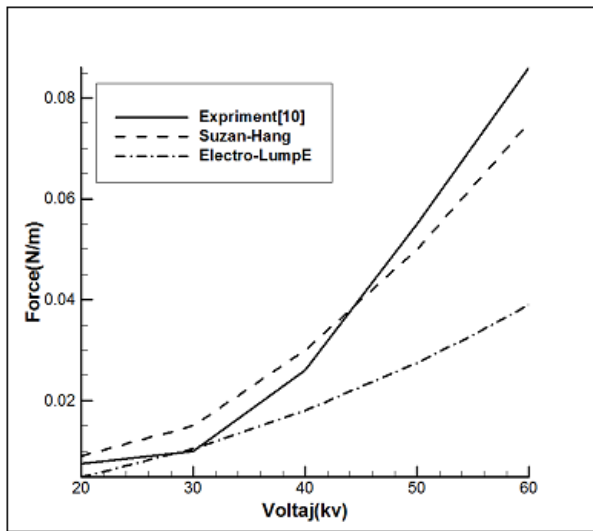
قسمت دوم به مقایسه ی نتایج حل عددی روش الکترواستاتیک-مدار تجمعی با نتایج تجربی مرجع [۱۱] که حالت غیردائم عملگر پلاسما را مورد بررسی قرار می دهد، می پردازد.

عملگر پلاسمایی که در مرجع [۱۱] از آن استفاده شده است، شامل دو الکتروود از جنس مس می باشد که ضخامت هر یک از آنها ۵۰ میکرومتر است. طول الکتروود آشکار که در معرض جریان آزاد قرار دارد یک سانتی متر و طول الکتروود پنهان در دی الکتریک نیز برابر با سه سانتی متر است. پهنای این الکتروودها که در راستای منظر بال قرار می گیرند به اندازه ی ۳۰ سانتی متر می باشد. برای جلوگیری از تماس الکتروودها چهار لایه دی الکتریک از جنس کپتون که هر کدام ضخامتی برابر با ۵۰ میکرومتر دارند، استفاده شده است. در روش عددی الکترواستاتیک-مدار تجمعی پس از اینکه ولتاژ روی سطح دی الکتریک بدست آمد، تفاضل ولتاژ سطح دی الکتریک و ولتاژ اعمالی تقسیم بر مقاومت پلاسما، شدت جریان عبور کننده از پلاسما را نشان می دهد که توسط رابطه ی (۵) محاسبه می شود.

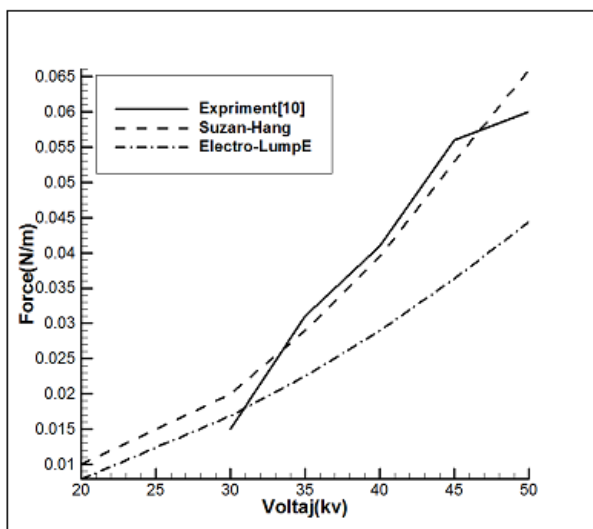
نمودار (۹) تغییرات جریان پلاسما بر حسب حداکثر ولتاژ اعمالی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود شیب خط در نتایج تجربی مرجع [۱۱] در ولتاژهای کم، زیاد است و با افزایش ولتاژ بتدریج این شیب کاهش می یابد. این نشان می دهد که افزایش ولتاژ ورودی، جریان عبوری از پلاسما را همواره افزایش نمی دهد بلکه یک مقدار بهینه ای برای ولتاژ



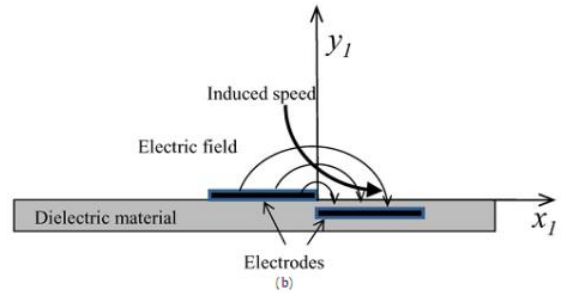
شکل ۶: نیروی تولید شده توسط پلازما در ولتاژهای متفاوت و فرکانس یک کیلوهرتز



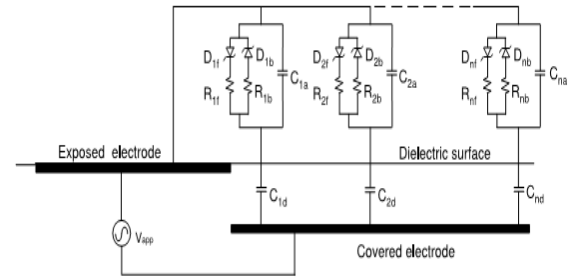
شکل ۷: نیروی تولید شده توسط پلازما در ولتاژهای متفاوت و فرکانس دو کیلوهرتز



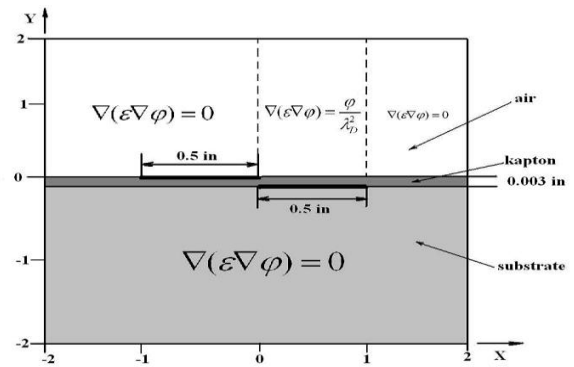
شکل ۸: نیروی تولید شده توسط پلازما در ولتاژهای متفاوت و فرکانس چهار کیلوهرتز



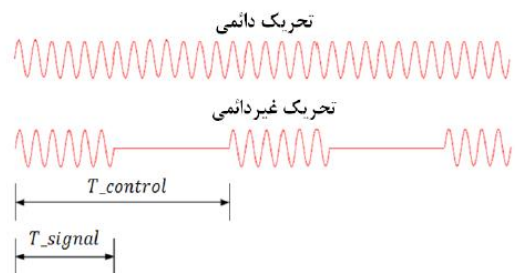
شکل ۲: شماتیکی باد یونی تولید شده توسط عملگر پلازما



شکل ۳: پارامترهای مدار تجمعی



شکل ۴: دامنه و شرایط مرزی حل معادله ی الکترواستاتیک برای بدست آوردن پتانسیل الکتریکی



شکل ۵: عملگر دائم و غیردائم

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

٧) Post, M., and Corke, T. "Separation control using plasma actuators", In Bulletin of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics. Vol 47 . 2006.

٨) Enloe, C., McLaughlin, T., VanDyken, R., and Fuscher, J. "Plasma structure in the aerodynamic plasma actuator". AIAA Journal.Vol 42. 2004.

٩) Thomas, F. O., Kozlov, A., and Corke, T. C. "Plasma Actuators for Bluff Body Flow Control". AIAA Journal, Vol. 44, 2006.

١٠) 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

١١) Font, G. Boundary Layer Control with Atmospheric Plasma Discharges. AIAA Paper 2004-3574, 2004.

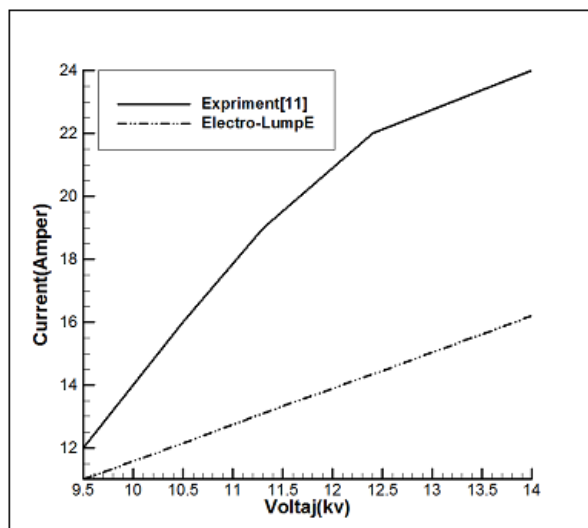
١٢) Joseph W. Ferry and Joshua L. Rovey "Thrust Measurement of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators and Power Requirements for Aerodynamic Control", 5th Flow Control Conference 28 June - 1 July 2010, Chicago, Illinois, AIAA 2010-4982.

١٣) Dmitriy M. Orlov "MODELLING AND SIMULATION OF SINGLE DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA ACTUATORS" PhD dissertation University of Notre dame, 2006.

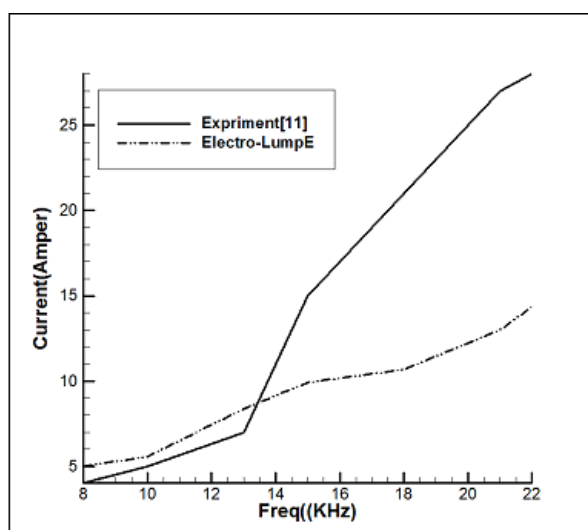
١٤) M. Pasandidefard, A. Sahaf, "A Numerical Model for Modeling the Effect of Plasma Actuators in Flow control", The 10th Iranian Aerospace Society Conference, Tehran 2011.

١٥) Corke, T. C., Mertz, B., and Patel, M. P. "Plasma Flow Control Optimized Airfoil." AIAA Paper 2006-1208, 2006.

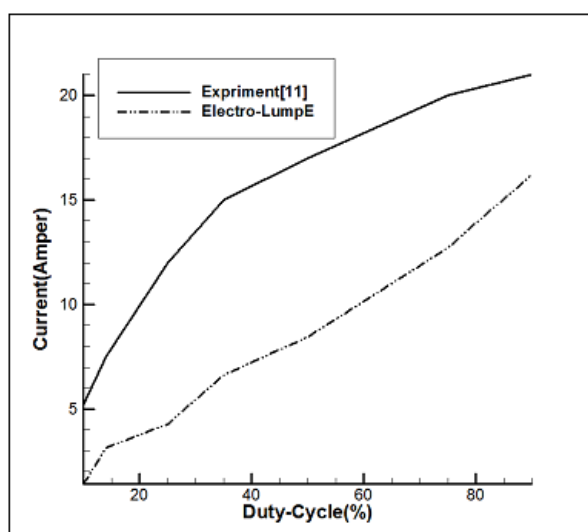
١٦) S.A. Sayyed-Shams Taleghani, A. Shadaram, and M. Mirzaei. "Experimental Investigation of Active Flow Control for Changing Stall Angle of a NACA0012 Airfoil, Using Plasma-Actuator." AIAA Paper 2006-1208, 2006.



شکل ٩: تاثیر ولتاژ بر شدت جریان عبوری از پلاسما



شکل ١٠: تاثیر فرکانس موج بر شدت جریان عبوری از پلاسما



شکل ١١: تاثیر سیکل کاری بر شدت جریان عبوری از پلاسما

منابع و مأخذ

١) Enloe, L., McLaughlin, T., Van Dyken, Kachner, Jumper, E., Corke, T., Post, M., and Haddad, "Mechanisms and