

علمی-پژوهشی

# بررسی عددی تأثیر جانمایی عملگر پلاسما بر روی مشخصه‌های آیرودینامیکی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲

مصطفی قدک <sup>۴</sup>	محمدعلی جزو وزیری <sup>۳*</sup>	حسن مسعودی راد <sup>۲</sup>	نوید فهیمی <sup>۱</sup>
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران	دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران	دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران	گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران
			(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶)

## چکیده

در این مطالعه، اثر پلاسما تخلیه الکتریکی بر روی جریان سیال حول ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ به‌ازای جانمایی عملگر پلاسما در موقعیت‌های ۲، ۶ و ۱۰ درصد طول وتر نسبت به لبه حمله ایرفویل با شدت پلاسما ۲۰ میلی نیوتن بر متر با استفاده از شبیه‌سازی‌های دوبعدی جریان آیرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت اعمال تخلیه پلاسما در این پژوهش از یک UDF در نرم‌افزار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاربرد عملگر پلاسما می‌تواند سبب تأخیر و اماندگی از زاویه حمله ۱۵ درجه به ۱۸ درجه و انتقال زاویه عملکرد بهینه ایرفویل (مطابق با بیشینه نسبت برآ به پسا) به زوایای حمله بالاتر شود (از ۸ درجه به ۱۰ درجه)، به‌طوری‌که جانمایی در نزدیکی ناحیه جدایش (موقعیت ۱۰ درصد) بازدهی آیرودینامیکی بالاتری در زوایای حمله کم‌تر دارد. با این وجود، افت بازدهی عملگر پلاسما در موقعیت ۱۰ درصد نسبت به عملگرهای نزدیک‌تر به لبه حمله در زوایای حمله بالاتر از ۱۰ درجه، بیش‌تر است. به‌علاوه، پتانسیل مثبت کاربرد پلاسما در بازه تغییرات عدد رینولدز مورد بررسی قرار گرفته است، به‌طوری‌که به‌کارگیری عملگر پلاسما در اعداد رینولدز ۱۰۰ هزار، ۱ میلیون و ۱۰ میلیون به ترتیب سبب بهبود بازدهی آیرودینامیکی به میزان ۱۶ درصد، ۱۸٫۹ درصد و ۷۰٫۲ درصد در زاویه عملکرد بهینه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** عملگر پلاسما، کنترل جریان، مدل‌سازی عددی، و اماندگی، بازده آیرودینامیکی

## Numerical Investigation of Effects of Plasma Actuator Placement on Aerodynamic Parameters of NACA 0012 Airfoil

Navid Fahimi	Hassan Masoudi-Rad	Mohammad Ali Jozv-Vaziri	Mostafa Ghadak
Electrical and Computer Engineering Department, University of Tehran	College of Technology and Engineering Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran	College of Technology and Engineering Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran	College of Technology and Engineering Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran
			(Received: 2023/ April /18; Accepted: 2023/August/07)

## ABSTRACT

In this study, effects of dielectric barrier discharge (DBD) plasma on aerodynamic flow are investigated around NACA 0012 airfoil for plasma placement according to horizontal position close to leading edge based on 2%, 6% and 10% of the chord length with 20 mN/m plasma momentum and a Reynolds number of  $10^6$  using 2-D aerodynamic flow simulations. A user-defined function (UDF) source code is developed for application of plasma discharge in this work. Obtained results show that application of plasma actuator results in delay of stall from 15 degree to 18 degree angle of attack (AOA) and aerodynamic efficiency toward higher AOAs (from 8 degree to 10 degree); where plasma placement close to separation region (according to 10% of chord length) has more aerodynamic efficiency compared to smaller AOAs. However, aerodynamic efficiency of 10% placement plasma is decreasing compared to plasma placement closer to leading edge for operation of higher than 10 degrees AOAs. In addition, positive capability of plasma actuator is investigated for wide range of Reynolds number, where plasma

۱- فارغ‌التحصیل دکتری: n.fahimi@ut.ac.ir

۲- مدرس: masoudirt@chmail.ir

۳- استادیار (نویسنده پاسخگو): Mohamad.ali.vaziri@chmail.ir

۴- مدرس: mghadak@chmail.ir

actuator results in improvement of aerodynamic efficiency equal to 16%, 18.9% and 70.2% in optimal AOA for Reynolds number of  $10^5$ ,  $10^6$  and  $10^7$ .

**Keywords:** Plasma actuator, flow control, numerical modeling, stall, aerodynamic efficiency

## فهرست علائم و اختصارات

$C_D$	ضریب پسا
$C_L$	ضریب برآ
$E$	شدت میدان الکتریکی، V/m
$F_b$	نیروی بدنه پلاسما، N/m
$P$	فشار، $N/m^2$
Re	عدد رینولدز
$v$	بردار سرعت، m/s (واحد اندازه بردار سرعت)
$V$	ولتاژ، V
<b>علائم یونانی</b>	
$\alpha$	زاویه حمله، $(^\circ)$
$\mu$	لزجت، kg/m.s
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\rho_e$	چگالی بار الکتریکی، $C/m^3$

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، علاقه به کاربرد پلاسما از نوع تخلیه حائل دی‌الکتریک<sup>۱</sup> (DBD) جهت کنترل جریان افزایش یافته که نمونه‌ای از آن، کاربرد ادوات پلاسما جهت کنترل کردن جدایش جریان در زوایای بالا است. به طور کلی در این روش ساختار دو الکترودی مسی نامتقارن که به‌وسیله عایق دی‌الکتریک حائل شده، به مجموعه ایرفویل‌ها اضافه می‌شود. در زمان اعمال ولتاژ فشارقوی به الکترودها، هوا در حضور میدان الکتریکی یونیزه می‌شود (تشکیل پلاسما)؛ در نتیجه پلاسما ایجاد شده یک نیروی بدنه به سیال پیرامون اعمال می‌کند [۲]. عملگر پلاسما DBD، به طور موفقیت‌آمیزی در گستره‌ای از کاربردهای کنترل جریان آیرودینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

کنترل جریان فعال در لایه‌مرزی سیال از طریق به‌کارگیری عملگر پلاسما به دلیل مصرف توان بسیار کم آن (کمتر از ۱۰۰ W) توجیه‌پذیر است. نیروهای تولید شده الکتریکی حاصل از عملگر پلاسما با تحت‌تأثیر قراردادن جریان حول ایرفویل می‌تواند باعث بهبود پارامترهای آیرودینامیکی شود. در قیاس با نمونه‌های مکانیکی، عملگرهای فعال مانند ادوات پلاسما دارای پاسخ زمانی بسیار سریع است.

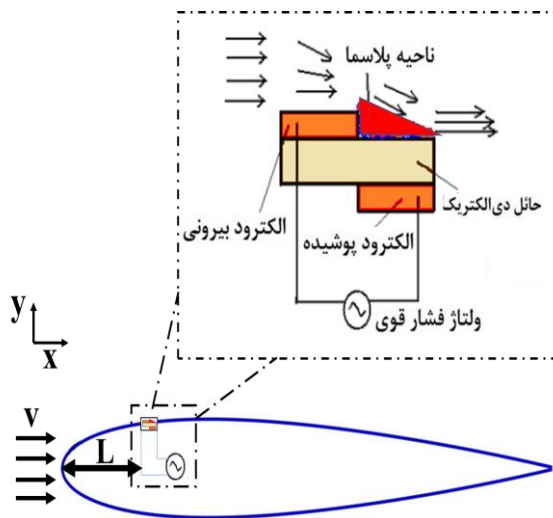
علی‌رغم پژوهش‌های گسترده در این حوزه، توسعه مدل‌های عددی با هدف ارزیابی تأثیرات عملگر پلاسما بر روی جریان در شرایط مختلف همچنان مورد توجه است. برای مثال، جدایش لایه مرزی در زوایای حمله بعد از زاویه واماندگی در اعداد رینولدز کم‌تر از  $10^5$  به‌صورت مقایسه مدل شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی بر روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ در مرجع [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. به طور مشابه، کاراداک و همکاران [۴]، تأخیر در جدایش لایه مرزی در زوایای حمله بالاتر در ایرفویل ناکا ۴۴۱۲ با هدف توسعه ابزارهای مقرون به صرفه، کنترل فعال جریان را مورد توجه قرار داده‌اند. عبدالرئوف و همکاران [۵]، یک مدل شبیه‌سازی عددی از عملگرهای پلاسما جهت بهبود ضرایب برآ و پسا در ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ توسعه دادند. بررسی مزایای کاربرد عملگرهای چندتایی از اهداف این پژوهش بوده است. سوندارام و همکاران [۶]، با هدف بررسی کنترل جریان‌های آیرودینامیکی یک تحلیل حساسیت را بر پایه مدل‌سازی عددی جهت بهینه‌سازی شدت نیروی پلاسما در شرایط سرعت‌های زیرصوت ارائه کردند. ساکیموتو و همکاران [۷]، پژوهش تحقیقاتی به‌منظور ارتقاء ضریب برآ در یک ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ با استفاده از عملگر پلاسما با هدف کنترل جدایش در لبه فرار انجام دادند.

پایه‌سازی بهینه عملگر پلاسما به پارامترهای گوناگونی وابسته است. به عنوان نمونه، تغییر ضخامت الکتروود بر روی ساختار پلاسما و نیروی خطی حاصل از آن [۸، ۹]، رابطه نیروی بدنه با عرض الکتروود پوشیده شده [۱۰]، رابطه نمایی بین ولتاژ اعمالی و نیروی پیشران القایی [۱۱، ۱۲]، و تأثیرات گسترش پلاسما با تغییر در فرکانس [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است.

در حوزه کنترل فعال جریان با استفاده از عملگر پلاسما DBD، همچنان خلأهای پژوهشی وجود دارد. به طور مثال، تأثیرات مولفه‌های کلیدی از قبیل جانمایی عملگر پلاسما بر بازدهی مؤثر عملگر پلاسما در زوایای حمله مختلف نیازمند بررسی دقیق‌تر است. همچنین، می‌بایست در نظر داشت که ارزیابی دقیق حساسیت مولفه‌های مختلف بر عملکرد کنترل فعال جریان پلاسما در شرایط آزمایشگاهی مستلزم صرف هزینه‌های بسیار زیاد است؛ بنابراین، ضرورت توسعه

<sup>1</sup> Dielectric Barrier Discharge

پلازما به شدت به شرایط محیطی وابسته است به طوری که با کاهش فشار، طول پلاسمای ایجاد شده به وسیله عملگر در جهت وتر، افزایش می‌یابد [۲]. در مدل شبیه‌سازی مطالعه حاضر، طول پلازما برابر ۱۰ mm و ضخامت آن ۲ mm در نظر گرفته شده است که معادل ابعاد نسبی نوار فویل مسی، با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته در مراجع گذشته، انتخاب شده است. در شکل ۱ نمایی از یک عملگر پلاسمای DBD و جانمایی آن در موقعیت مختلف نسبت به وتر ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ (۲ درصد، ۶ درصد و ۱۰ درصد) با شدت نیروی بدنه  $20 \text{ mN.m}^{-1}$  (معادل ولتاژ ۲۱ kV) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که جانمایی پلازما در نزدیکی لبه حمله (پیش از ناحیه جدایش) منجر به اتصال مجدد ناحیه جدا شده جریان حول ایرفویل می‌شود [۱۶].



شکل (۱): نمایی از عملگر پلاسمای DBD و جانمایی آن در موقعیت نزدیک به لبه حمله ایرفویل ناکا ۰۰۱۲

### ۳- معادلات حاکم

در معادلات جریان سیال، تخلیه پلاسمای سبب اعمال نیرویی به سیال پیرامون آن شده که می‌تواند از جدایش جریان جلوگیری کند [۱۸]. عبارت نیروی بدنه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$F_b = \rho_e E \quad (1)$$

مدل‌های عددی باهدف پاسخ به خلأهای پژوهشی ذکر شده امری اجتناب‌ناپذیر است.

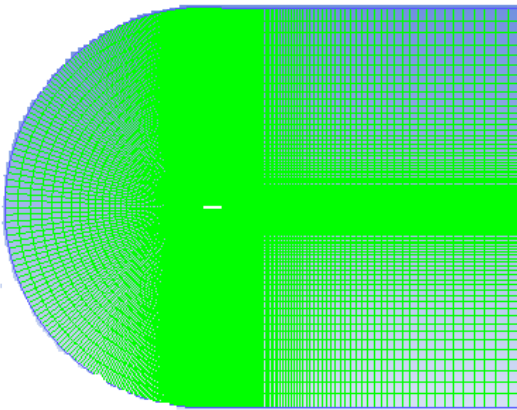
به‌منظور ارزیابی عملکرد عملگرهای پلازما در کنترل جریان سیال اطراف یک ایرفویل، در این پژوهش، یک مدل شبیه‌سازی عددی از کاربرد عملگر پلازما بر روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در نرم‌افزار فلونت<sup>۱</sup> توسعه‌یافته است. مدل شبیه‌سازی عددی توسعه‌یافته در دو حالت بدون پلازما و با پلازما به‌ازای جانمایی مختلف عملگر پلازما در موقعیت ۲ درصد، ۶ درصد و ۱۰ درصد نسبت به لبه حمله ایرفویل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، اثربخشی پلازما در بازه تغییرات وسیع عدد رینولدز از دیگر اهداف پژوهش حاضر است. این بررسی باهدف مطالعه تأثیرات مختلف پلازما بر روی مشخصه‌های آیرودینامیکی از قبیل ضریب برآ، ضریب پسا، بازه آیرودینامیکی (نسبت برآ به پسا)، زاویه عملکرد بهینه و زاویه واماندگی صورت می‌پذیرد.

### ۲- پیاده‌سازی عملگر پلازما

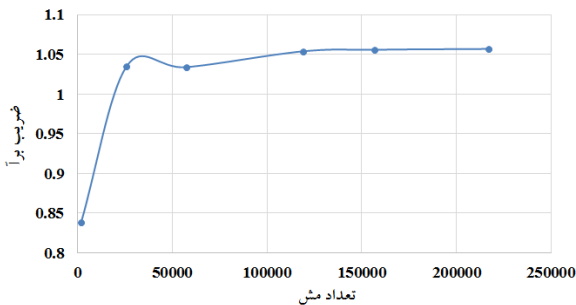
هندسه مورد بررسی، ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ به طول وتر ۱ m است. پیاده‌سازی عملگر پلازما در میدان محاسباتی از طریق نیروی بدنه (به عنوان یک عبارت منبع در معادلات جریان سیال) هم‌ارز با اعمال ولتاژ در یک محدوده مشخص (عرض و ضخامت پلازما) صورت می‌گیرد. در مراجع مختلف، روابط متفاوتی جهت سازگاری میان ولتاژ اعمال شده و نیروی بدنه حاصل از پلازما ارائه شده است. حداقل ولتاژ مورد نیاز به‌منظور ایجاد نیروی بدنه معادل  $1 \text{ mN.m}^{-1}$ ،  $10 \text{ mN.m}^{-1}$  و  $20 \text{ mN.m}^{-1}$  به ترتیب برابر با ۵،۹۲ kV، ۱۵،۷۷ kV و ۲۱ kV گزارش شده است [۱۴]. بنابراین، یک رابطه تقریبی برای ولتاژ اعمال شده به‌صورت نمایی از مرتبه ۲،۳ با نیروی بدنه حاصل از پلازما برقرار است. الکترودهای عملگر پلازما را می‌توان از نوار فویل مسی نازک درست کرد و برای الکترودها در یک آرایش نامتقارن، ابعاد ناحیه پلازما تقریباً به همان اندازه ارتفاع یا ضخامت الکتروود در معرض جریان است [۱، ۱۵]. با این وجود، طول

<sup>۱</sup> FLUENT

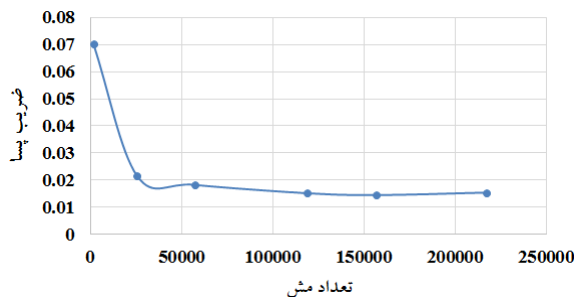
دلیل کم بودن سرعت و تراکم ناپذیر بودن جریان، چگالی ثابت و معادله انرژی غیرفعال است. همچنین، برای مدل سازی آشفتگی از مدل  $k-\omega$  SST استفاده شده است. مقادیر  $y^+$  در همه تحلیل های انجام شده کمتر از مقدار ۵ می باشد. معیار همگرایی در محاسبات علاوه بر کاهش مقادیر باقیمانده به کمتر از  $10^{-5}$ ، ثابت شدن مقادیر برآ و پسا تعیین شد.



شکل (۲). نمایی از میدان محاسباتی و شبکه ایجاد شده



شکل (۳). ضریب برآ به ازای تعداد مش



شکل (۴). ضریب پسا به ازای تعداد مش

#### ۵- اعتبارسنجی

در این قسمت اعتبارسنجی مدل شبیه سازی عددی با توجه به نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۹] برای یک ایرفویل

که  $E$  و  $\rho_e$  به ترتیب چگالی بار بر حسب  $C.m^{-3}$  و میدان الکتریکی بر حسب  $V.m^{-1}$  است. پتانسیل اعمال شده از رابطه زیر (معروف به معادله پواسن<sup>۱</sup>) با میدان الکتریکی مرتبط است.

$$E = -\nabla V \quad (2)$$

باتوجه به معادله بالا، میدان الکتریکی در یک پله زمانی مشخص، به مقدار حد شکست خود می رسد و تخلیه الکتریکی آغاز می شود.

جهت مدل کردن یک عملگر پلازما در نرم افزار فلونت، یک تابع تعریف شده توسط کاربر<sup>۲</sup> (UDF) را می توان اعمال کرد که با اضافه کردن یک عبارت منبع نیروی بدنه به معادله مومنوم صورت می پذیرد:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho \bar{f} \quad (3)$$

$$\rho \bar{f} = \bar{F}_b = \rho_e \bar{E} \quad (4)$$

در اینجا،  $v$ ،  $\rho$ ،  $\mu$ ،  $P$  به ترتیب سرعت میدان جریان، چگالی، فشار و لزجت دینامیکی است. اندازه منبع تکانه مستقیماً متناسب با توان مورد نیاز عملگر است.

این عبارت نیروی بدنه، به ناحیه مشخص شده به صورت موقعیت و ابعاد ناحیه پلاسمای عملگر محدود می شود.

#### ۴- مدل سازی عددی

به منظور مدل سازی عددی یک شبکه با سازمان در میدان حل پیرامون ایرفویل ایجاد شده است. فرآیند استقلال حل از شبکه برای ۶ شبکه متفاوت انجام گردید. تعداد گره های ایجاد شده برای شبکه نهایی ۱۱۸۹۴۷ به دست آمد. شکل ۲ میدان و شبکه محاسباتی و شکل های ۳ و ۴ به ترتیب ضریب برآ و ضریب پسا به ازای تعداد گره های مختلف شبکه برای مطالعه حاضر را نشان می دهد. در این مطالعه از شیوه تحلیل بر مبنای فشار<sup>۳</sup> و الگوریتم کوپل فشار و سرعت<sup>۴</sup> استفاده شده است. همچنین، معادلات حاکم به صورت مرتبه دو گسسته شده اند. در مطالعه حالت پایه، چگالی  $kg.m^{-3}$  ۱،۲۲۵، لزجت  $kg.m^{-1}s^{-1}$   $1.79 \times 10^{-5}$  و مقدار سرعت برابر با  $15 m.s^{-1}$  در نظر گرفته شده است. در این شرایط، به

<sup>1</sup> Poisson's equation

<sup>2</sup> User Defined Function

<sup>3</sup> Pressure-Based

<sup>4</sup> Coupled algorithm

**شکل (۵):** مقایسه ضریب برآ بر حسب زاویه حمله در کار حاضر و نتایج تجربی [۱۹]

#### ۶- نتایج و بحث

نتایج مدل شبیه‌سازی عددی مطابق با پارامترهای ورودی سرعت  $15 \text{ m.s}^{-1}$ ، عدد رینولدز یک میلیون و شدت نیروی بدنه  $20 \text{ mN.m}^{-1}$  (معادل ولتاژ تقریبی  $21 \text{ kV}$ ) به‌ازای جانمایی‌های مختلف عملگر پلاسما در موقعیت‌های ۲ درصد، ۶ درصد و ۱۰ درصد نسبت به طول وتر ارائه شده است. کانتورهای سرعت جریان به‌ازای جانمایی‌های مختلف عملگر پلاسما در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که جانمایی عملگر پلاسما سبب افزایش انرژی سیال در زوایای حمله ۶ و ۱۴ درجه شده است و ناحیه با تکانه بالاتر با دورتر شدن عملگر از لبه حمله بزرگ‌تر شده است که این می‌تواند حاکی از تأثیر کاربرد عملگر پلاسما را در به تأخیرانداختن جدایش باشد. به طور مشابه، مقایسه ناحیه جدایش به‌ازای موقعیت‌های مختلف عملگر پلاسما زاویه حمله ۱۴ درجه در شکل ۷ بیانگر آن است که هر سه جانمایی عملگر پلاسما از تشکیل حباب جدایش در لبه فرار جلوگیری می‌کند. به‌علاوه، مزیت تضعیف ناحیه مرده (سرعت پایین) توسط پلاسما به‌ازای جانمایی عملگر پلاسما در نقاط دورتر از لبه حمله ملموس‌تر است.

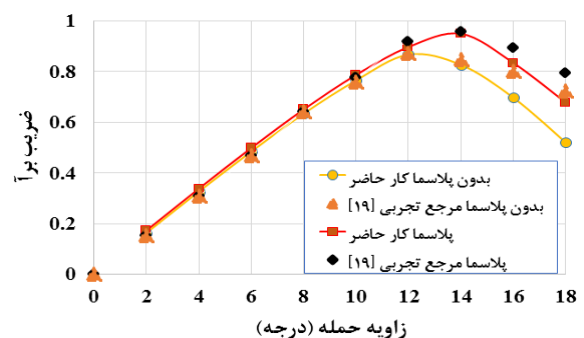
همچنین، نتایج مدل‌سازی عددی به‌ازای جانمایی عملگر پلاسما در موقعیت‌های مختلف نسبت به وتر برای ضرایب نیروی برآ، ضرایب نیروی پسا، نسبت نیروی برآ به نیروی پسا و ضریب گشتاور به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۱ نشان داده شده است. باتوجه به شکل‌های ذکر شده نکات زیر، قابل مشاهده است:

- کاربرد عملگر پلاسما در تمام موقعیت‌ها نسبت به وتر سبب تأخیر و اماندگی شده است (شکل ۸). تشکیل جدایش از حدود ۱۵ درجه در حالت بدون پلاسما به‌ازای موقعیت‌های ۲ درصد، ۶ درصد و ۱۰ درصد به ترتیب به زوایای ۱۷ درجه، ۱۸ درجه و ۱۸ درجه صورت پذیرفته است.
- بازده آیرودینامیکی به‌صورت نسبت برآ به پسا تعریف شده است [۲۲]. عملگر پلاسما به‌ازای تمام حالات سبب بهبود هم‌زمان ضریب برآ و پسا شده است. در

ناکا  $0.012$  با طول وتر  $152 \text{ mm}$  مورد بررسی قرار گرفته است.

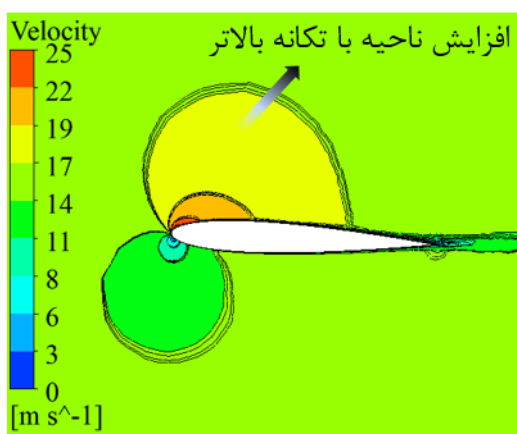
در شکل ۵ نتایج ضرایب برآ به دست آمده از مدل شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی به‌ازای زوایای حمله در حالت‌های بدون پلاسما و با پلاسما مقایسه شده است. لازم به ذکر است که نتایج آزمایشگاهی در چگالی  $\text{kg.m}^{-3}$   $1.225$ ، لزجت  $\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$   $1.79 \times 10^{-5}$  و مقدار سرعت برابر با  $\text{m.s}^{-1}$   $36$  معادل عدد رینولدز  $3.7 \times 10^5$  ارائه شده است. عملگر پلاسما در موقعیت ۱۴ درصد وتر صورت پذیرفته است. مطابق با مرجع، به‌ازای ولتاژ ورودی  $20 \text{ kV}$ ، ضخامت پلاسما ایجاد شده برابر  $1.5 \text{ mm}$  میلی‌متر و توان مصرفی برابر  $9.6 \text{ W}$  ثبت شده است.

شکل ۵ نشان می‌دهد که با به کارگیری عملگر پلاسما در شرایط آزمایشگاهی سبب تأخیر و اماندگی از زاویه ۱۲ درجه به ۱۴ درجه شده که می‌توان در نتایج مدل شبیه‌سازی عددی نیز آن را مشاهده کرد. همچنین، سازگاری نتایج مدل شبیه‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی در دو حالت بدون پلاسما و با پلاسما قبل از ناحیه و اماندگی بیش از ۹۷ درصد در هر دو حالت و در زاویه حمله ۱۶ درجه به ترتیب برابر ۸۶،۹ درصد و ۹۳،۳ درصد به دست آمد. می‌بایست به این نکته توجه داشت که با وجود آن‌که داده‌های آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی در دسترس است، اما تحقق دقیق آن‌ها با شبیه‌سازی‌های دو بعدی دشوار است (به ویژه در زوایای حمله بالاتر در نزدیکی و اماندگی و پس از آن). در مراجع [۲۰، ۲۱]، چالش تفاوت میان نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های دو بعدی در زوایای حمله بالا مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین، به سبب عدم دسترسی به برخی جزئیات دقیق پیاده‌سازی عملگر پلاسما در مرجع تجربی [۱۹] (از قبیل ضریب دی‌الکتریک حائل دی‌الکتریک)، اختلاف در مقایسه نتایج در حالت‌های پلاسما بیش‌تر است.

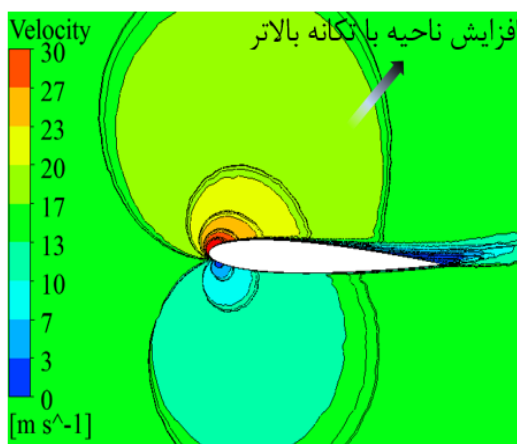


بیشتر از عملگر ۱۰ درصد بوده است (بر خلاف زوایای حمله کوچکتر).

- باملاحظه شکل ۱۱، در حالت بدون پلاسما تا قبل از ناحیه واماندگی وضعیت پایدار اما در حالت واماندگی، شرایط به سمت ناپایداری پیش می‌رود. این در حالی است که در حضور پلاسما به ازای جانمایی‌های مختلف در ناحیه نزدیک واماندگی و پس از واماندگی پایداری بهبود یافته است. به طور کلی، نتایج این شکل نشان‌دهنده آن است که به ازای کاربرد عملگر ۶ درصد و ۱۰ درصد، وضعیت پایداری بهتر است. لازم به ذکر است که در این بررسی،  $C_g$  در ۲۵ درصد طول وتر در نظر گرفته شده است.



الف-

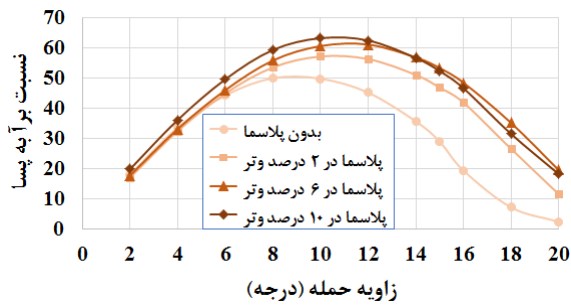


ب-

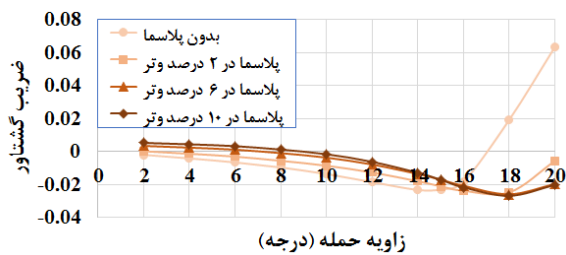
شکل (۶). کانتور سرعت به ازای حالت‌های مختلف جانمایی پلاسما الف: زاویه حمله ۶ درجه و ب: زاویه حمله ۱۴ درجه

نتیجه، شاخص کلیدی نسبت برآ به پسا در تمام حالات بهبود یافته است که به صورت انتقال به ناحیه بالاتر به ازای تمام حالات جانمایی عملگر پلاسما نسبت به حالت بدون پلاسما در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود. به علاوه، بیشینه شاخص نسبت برآ به پسا (بالاترین بازدهی آیرودینامیکی) از زاویه ۸ درجه در حالت بدون پلاسما به زاویه ۱۰ درجه در موقعیت‌های مختلف پلاسما انتقال یافته است.

- با نگاه دقیق‌تر به شکل ۱۰ می‌توان ملاحظه کرد که با وجود آن که عملکرد کلی پلاسما در موقعیت ۱۰ درصد بهتر از موقعیت ۶ درصد و موقعیت ۶ درصد بهتر از موقعیت ۲ درصد است (بازدهی آیرودینامیکی بالاتر)، اما فاصله بیش‌تر پلاسما از موقعیت لبه حمله موید بهبود بیش‌تر بازدهی آیرودینامیکی در زوایای حمله کوچک‌تر (تا ۱۰ درجه) و بهبود کم‌تر بازدهی آیرودینامیکی در زوایای حمله بزرگ‌تر است (مقایسه جانمایی در ۶ درصد و ۱۰ درصد و تر به ازای زوایای حمله بزرگ‌تر از ۱۲ درجه). به طور خاص، هر چند عملگر در موقعیت ۲ درصد بهبود کم‌تری نسبت به دو عملگر دیگر داشته است، اما افت بازدهی آن در زوایای بزرگ‌تر از ۱۰ درجه نیز کم‌تر از دو عملگر دیگر است. مهم‌ترین دلیل این امر نزدیکی بیش‌تر دو عملگر دورتر (به ویژه عملگر ۱۰ درصد) به ناحیه جدایش در حالت بدون پلاسما (۱۵ درجه) است. به طور دقیق‌تر، بازدهی آیرودینامیکی در زاویه ۸ درجه به میزان ۷,۲ درصد، ۱۱,۸ درصد و ۱۸,۸ درصد نسبت به حالت بدون پلاسما به ترتیب به ازای جانمایی ۲, ۶ و ۱۰ درصد بهبود یافته است. به طور مشابه، میزان بهبود بازدهی آیرودینامیکی در زاویه ۱۰ درجه ۹,۹ درصد، ۲۱,۹ درصد و ۲۷,۱ درصد نسبت به حالت بدون پلاسما به ترتیب به ازای جانمایی ۲, ۶ و ۱۰ درصد به دست آمده است. در حالی که در زاویه ۱۶ درجه میزان بهبود بازدهی آیرودینامیکی نسبت به حالت بدون پلاسما برابر ۱۱۶,۵ درصد، ۱۵۰ درصد و ۱۴۰,۷ درصد به دست آمده است. بنابراین، ملاحظه می‌شود که اولاً به کارگیری عملگر پلاسما در زوایای حمله بالاتر اثربخشی چشم‌گیرتری داشته است و ثانیاً در زوایای حمله بالاتر از ۱۴ درجه بهبود بازدهی عملگر ۶ درصد

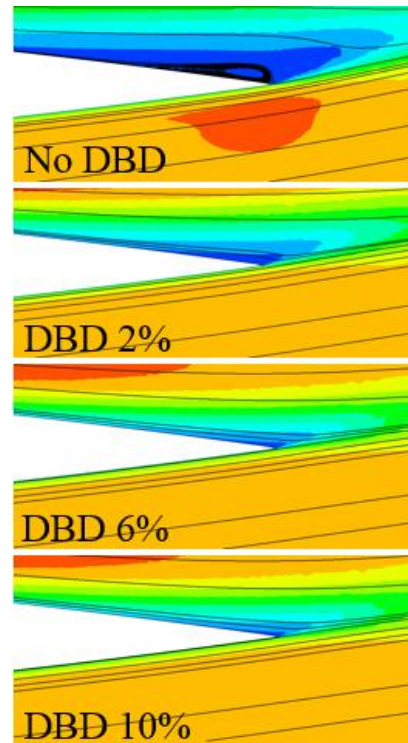


شکل (۱۰). نسبت برآ به پسا بر حسب زاویه حمله به ازای جانمایی مختلف پلاسما

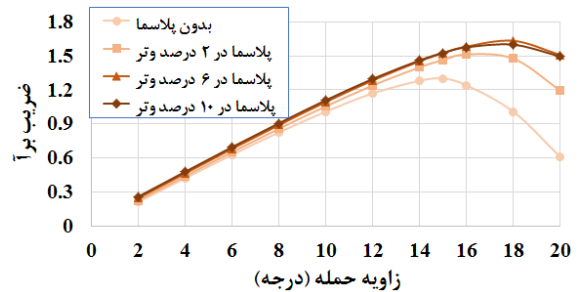


شکل (۱۱). ضریب گشتاور برای تمام زوایای حمله به ازای جانمایی مختلف پلاسما

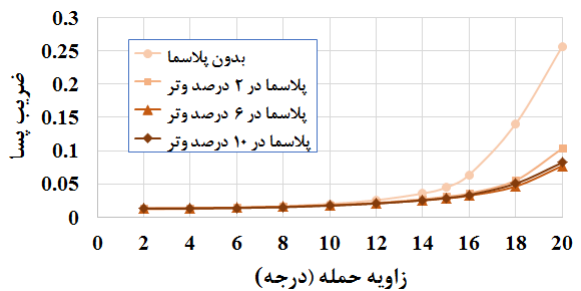
در شکل ۱۲ موقعیت تقریبی جدایش نسبت به لبه حمله برای حالت بدون پلاسما و جانمایی‌های مختلف پلاسما با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌شود، در حالت بدون پلاسما با افزایش زاویه حمله، نقطه جدایش از لبه فرار به سمت لبه حمله حرکت می‌کند (انتقال از ۹۰ درصد در زاویه ۱۴ درجه به ۲,۴ درصد در زاویه ۲۰ درجه). با مقایسه حالت بدون پلاسما و جانمایی‌های مختلف پلاسما مشاهده می‌شود که تمام حالات جانمایی پلاسما باعث انتقال نقطه جدایش به نقاط دورتر از لبه حمله شده است. همچنین، آنچه قبلاً در ارتباط با مقایسه جانمایی ۶ درصد و ۱۰ درصد بیان شده نیز به صورتی دیگر تایید شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود عملکرد عملگر ۶ درصد باعث انتقال نقطه جدایش به نقاط دورتر از لبه حمله در قیاس با عملگر ۱۰ درصد شده است. برای مثال، در زاویه حمله ۱۸ درجه به ازای جانمایی ۶ درصد، نقطه جدایش در موقعیت ۷۹ درصد و به ازای جانمایی ۱۰ درصد، نقطه جدایش در موقعیت ۷۳ درصد به دست آمده است. بنابراین، با توجه به ایجاد نقطه جدایش در نزدیکی لبه حمله به ازای زوایای حمله بسیار بزرگ، عملکرد عملگر ۶ درصد مطلوب‌تر از عملگر ۱۰



شکل (۷). تشکیل ناحیه جدایش در لبه فرار به ازای زاویه حمله ۱۴ درجه در حالت بدون پلاسما و جانمایی عملگر پلاسما در موقعیتهای مختلف



شکل (۸). ضریب برآ بر حسب زاویه حمله به ازای جانمایی مختلف پلاسما



شکل (۹). ضریب پسا بر حسب زاویه حمله به ازای جانمایی مختلف پلاسما



رینولدز بالاتر (در سرعت ثابت) و در نتیجه کاهش اثر اصطکاک سطحی، زاویه انتقال به شرایط واماندگی در اعداد رینولدز بالاتر به شدت کاهش می‌یابد (از ۲۰ درجه در عدد رینولدز  $10^5$  به ۷ درجه در عدد رینولدز  $10^8$ ). با این وجود، با فرض ثابت بودن شدت نیروی پلاسما (وابسته به چگالی ذرات باردار یونیزه شده)، اثربخشی عملگر پلاسما در بازه تغییرات عدد رینولدز (در اینجا تغییر لزجت) محفوظ است، هر چند این امر منوط به ثابت ماندن شدت نیروی پلاسما در لزجت‌های مختلف است.

- به طور مشابه، مقایسه شاخص کلیدی نسبت برآ به پسا در شرایط اعداد رینولدز مختلف بیانگر آن است که بیشینه شاخص نسبت برآ به پسا (بالاترین بازدهی آیرودینامیکی) از زاویه ۸ درجه در حالت بدون پلاسما به زاویه ۱۰ درجه در اعداد رینولدز  $10^6$  و  $10^7$  انتقال یافته است و به ازای اعداد رینولدز  $10^5$  و  $10^8$  (لزجت بسیار کم و لزجت بسیار زیاد) انتقال بازدهی بهینه به زاویه بالاتر حمله صورت نمی‌پذیرد. همچنین بیشینه شاخص کلیدی نسبت برآ به پسا (معادل بازدهی آیرودینامیکی در زاویه حمله بهینه) در حالت پلاسما نسبت به حالت بدون پلاسما به میزان ۱۶ درصد، ۱۸٫۹ درصد، ۷۰٫۲ درصد و ۵٫۵ درصد به ترتیب در اعداد رینولدز  $10^5$ ،  $10^6$ ،  $10^7$  و  $10^8$  بهبود یافته است. به طور کلی، نتایج این بخش، موید آن است که تغییرات عدد رینولدز در سرعت ثابت میدان (هم ارز تغییر لزجت) از مرتبه مثبت ۱۰ و منفی ۱۰ نسبت به هوای آزاد در ۱ atm و دمای  $20^\circ\text{C}$ ، در عملکرد مثبت، موثر و بهینه عملگر پلاسما چالشی ایجاد نخواهد کرد. تغییرات لزجت در مرتبه‌های بالاتر از هر دو جنبه تأثیرات آن بر پارامترهای آیرودینامیکی در حالت بدون پلاسما و نیز شدت نیروی پلاسما وابسته به

درصد شده است که این امر بر خلاف زوایای حمله کوچک‌تر است.



شکل (۱۲). موقعیت جدایش نسبت به لبه حمله برای تمام زوایای حمله به ازای جانمایی مختلف پلاسما

یافته‌های مقاله حاضر علاوه بر زاویه حمله تابع عدد رینولدز نیز است. به منظور بررسی اثربخشی عملگر پلاسما در یک موقعیت خاص، در این قسمت مطالعه اثر عدد رینولدز بر روی پارامترهای آیرودینامیکی مورد توجه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی به‌ازای شدت نیروی پلاسما ثابت  $20 \text{ mN.m}^{-1}$  و تغییرات عدد رینولدز به‌ازای عدد ماخ ثابت (سرعت  $15 \text{ m.s}^{-1}$ ) در دو حالت بدون پلاسما و با پلاسما با یکدیگر مقایسه شده است. این امر به معنای تغییرات لزجت به‌منظور بررسی اعداد رینولدز  $10^5$ ،  $10^6$ ،  $10^7$  و  $10^8$  است. اشاره شده است که لزجت یکی از دلایل جدایش جریان لایه‌مرزی است [۲۳]. نتایج مدل‌سازی عددی به ازای اعداد رینولدز  $10^5$ ،  $10^6$ ،  $10^7$  و  $10^8$  مطابق با موقعیت پلاسما در دو درصد وتر برای ضرایب نیروی برآ و نسبت نیروی برآ به نیروی پسا به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ذکر شده نکات زیر، قابل مشاهده است:

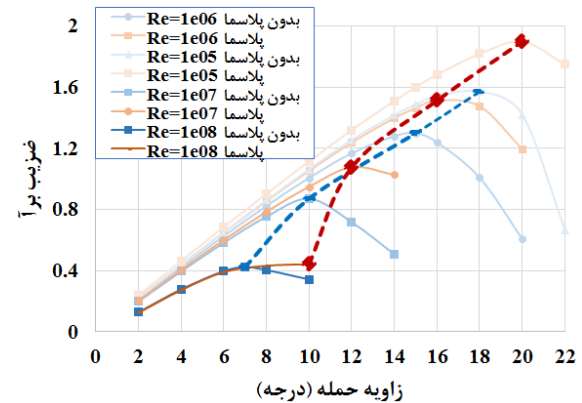
- کاربرد عملگر پلاسما در تمام اعداد رینولدز (سرعت ثابت و تغییرات لزجت)، سبب انتقال لایه‌مرزی آشفستگی (زاویه واماندگی) شده است (شکل ۱۲). این افزایش به‌صورت ۲ درجه در اعداد رینولدز  $10^5$ ،  $10^6$ ،  $10^7$  و ۳ درجه در عدد رینولدز  $10^8$  تحقق یافته است. لازم به ذکر است که به سبب کوچک‌تر شدن لزجت در اعداد

از ۸ درجه می‌شود. جانمایی متفاوت عملگر پلاسما بیانگر عملکرد مؤثرتر عملگر پلاسما در موقعیت دورتر نسبت به لبه حمله به‌ویژه در زوایای حمله کوچک‌تر است. با این وجود، افت بازدهی عملگر پلاسما جانمایی شده در نقاط دورتر نسبت به عملگر جانمایی شده در نزدیکی لبه حمله در زوایای حمله بزرگ‌تر بیش‌تر است. همچنین، بررسی عملکرد عملگر پلاسما به‌ازای تغییرات عدد رینولدز در سرعت ثابت و طول وتر ثابت مطابق با تغییرات لزجت موید آن است که عملکرد عملگر پلاسما در بازه قابل‌توجهی از کوچک‌تر یا بزرگ‌تر شدن لزجت مشروط به حفظ چگالی بار ذرات یونیزه شده، با چالش مواجه نخواهد شد.

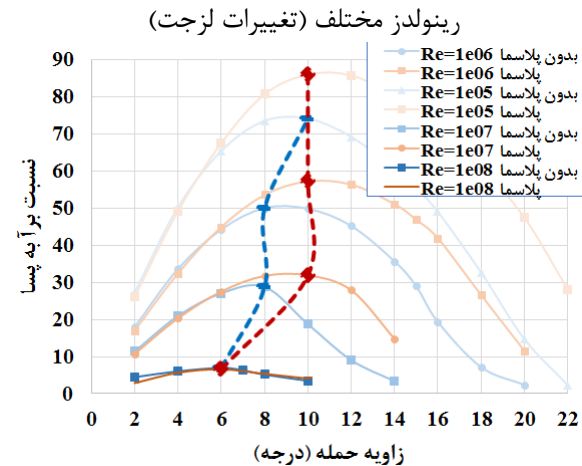
#### ۸- مراجع

- [C. He, T. C. Corke, and M. P. Patel, "Plasma flaps and slats: an application of weakly ionized plasma actuators," J. of Aircr., vol. 46, no. 3, pp. 864-873, 2009.
- T. Nichols and J. Rovey, "Fundamental processes of DBD plasma actuators operating at high altitude," in 50th AIAA Aerosp. Sci. mtg. incl. the New Hor. Forum and Aerosp. Expo., 2012, p. 822 .
- K. Fujii, "Three flow features behind the flow control authority of DBD plasma actuator: Result of high-fidelity simulations and the related experiments," Appl. Sci., vol. 8, no. 4, p. 546, 2018.
- B. Karadag, C. Kolbakir, and A. S. Durna, "Plasma actuation effect on a NACA 4412 airfoil," Aircr. Eng. and Aerosp. Tech., vol. 93, no. 10, pp. 1610-1615 , 2021.
- H. Abdelraouf, S. Z. Kassab, and A. M. N. Elmekawy, "Simulations of Flow Separation Control Using Different Plasma Actuator Models," in Fluids Eng. Div. Sumr. Mtg., 2020, vol. 83723: ASME, p. V002T03A047 .
- P. Sundaram, S. Sengupta, V. K. Suman, T. K. Sengupta, Y. G. Bhumkar, and R. K. Mathpal, "Flow control using single dielectric barrier discharge plasma actuator for flow over airfoil," Phys Fluid.s, vol. 34, no. 9, p. 095134, 2022.
- S. Sekimoto et al., "Flow Control around NACA0015 Airfoil Using a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator over a Wide Range of the Reynolds Number," in Actuators, 2023, vol. 12, no. 1: MDPI, p. 43

شدت میدان الکتریکی و چگالی ذرات باردار نیازمند بررسی جامع‌تر است.



شکل (۱۳). ضریب برآ بر حسب زاویه حمله به ازای اعداد



شکل (۱۴). نسبت برآ به پسا بر حسب زاویه حمله به ازای اعداد رینولدز مختلف (تغییرات لزجت)

#### ۷- نتیجه‌گیری

در مطالعه ارائه شده، یک مدل شبیه‌سازی عددی از کاربرد عملگر پلاسما از نوع تخلیه حائل دی‌الکتریک بر روی یک ایرفویل استاندارد توسعه یافت. نتایج بیانگر جلوگیری از تشکیل حباب جدایش به‌ازای جانمایی‌های مختلف عملگر پلاسما در موقعیت‌های ۲ درصد، ۶ درصد و ۱۰ درصد نسبت به طول وتر ایرفویل در قیاس باحالت بدون پلاسما در زوایای حمله بالا است. نتایج حاکی از آن است که کاربرد عملگر پلاسما سبب بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی (نسبت قبیل ضریب برآ، ضریب پسا و بازده آیرودینامیکی) نسبت برآ به پسا) می‌شود. همچنین، کاربرد عملگر پلاسما سبب تأخیر واماندگی و زاویه عملکرد بهینه در زوایای حمله بالاتر

20. R. Galbraith, M. Gracey, and E. Leitch, "Summary of Pressure Data for Thirteen Aerofoils on the University of Glasgow's Aerofoil Database. GU Aero Report 9221," 1992.
21. W. McCroskey, "A critical assessment of wind tunnel results for the NACA 0012 airfoil," 1987 .
22. N. Couto and J. M. Bergada " Aerodynamic efficiency improvement on a NACA-8412 airfoil via active flow control implementation," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 9, p. 4269, 2022.
23. C.-F. Zou, D.-Y. Wang, and Z.-H. Cai, "Effects of boundary layer and liquid viscosity and compressible air on sloshing characteristics," *Int. J. of Nav. Archit.*, vol. 7, no. 4, pp. 670-690, 2015.
8. C. L. Enloe et al., "Mechanisms and responses of a dielectric barrier plasma actuator: Geometric effects," vol. 42, no. 3, pp. 595-604, 2004.
9. D. Orlov, T. Corke, and M. Patel, "Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator," in 44th AIAA Aerosp. Sci. Mtg. and Ex., 2006, p. 1206 .
10. M. Forte, J. Jolibois, J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, and M. Cazalens, "Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control," *Exp. in fluids*, vol. 43, no. 6, pp. 917-928, 2007.
11. C. Enloe, T. E. McLaughlin, R. D. VanDyken, K. Kachner, E. J. Jumper, and T. C. Corke, "Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: plasma morphology," *AIAA journal*, vol. 42, no. 3, pp. 589-594, 2004
12. F. O. Thomas, T. C. Corke, M. Iqbal, A. Kozlov, and D. Schatzman, "Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control," *AIAA journal*, vol. 47, no. 9, pp. 2169-2178, 2009.
13. D. M. Orlov, *Mod. and sim. of SDBD plasma actuators*. 2006.
14. C. Porter, J. Baughn, T. McLaughlin, L. Enloe, and G. Font, "Temporal force measurements on an aerodynamic plasma actuator," in 44th AIAA Aerosp. Sci. Mtg. and Ex., 2006, p. 104 .
15. T. Corke and M. Post, "Overview of plasma flow control: concepts, optimization, and applications," in 43rd AIAA aerosp. sci. mtg. and ex., 2005, p. 563 .
16. X. Zhang, L. Huaxing, Y. Huang, T. Kun, and W. Wanbo, "Leading-edge flow separation control over an airfoil using a symmetrical dielectric barrier discharge plasma actuator," *Chinese J. of Aeronaut.*, vol. 32, no. 5, pp. 1190-1203, 2019.
17. X. Zhang, H.-X. Li, Y. Huang, and W.-B. Wang, "Wing flow separation control using asymmetrical and symmetrical plasma actuator," *J. of Aircr.*, vol. 54, no. 1, pp. 301-309, 2017.
18. M. Gad-el-Hak, "Flow control," 1989.
19. S. S.-S. Taleghani, A. Shadaram, and M. Mirzaei, "Experimental Investigation of Active Flow Control for Changing Stall Angle of a NACA0012 Airfoil, Using Plasma-Actuator," *Fluid Mech. and Aerodyn. J.*, vol. 1, pp. 89-97, 2012 (in Persian).