



بررسی عددی و تجربی اثر یک عملگر پلاسمایی بر کارایی ایرفویل NLF0414 در زوایای حمله پس از واماندگی

عاطفه سلماسی^۱، عبدالله شادآرام^{۲*}، مسعود میرزایی^۳، آرش شمس طالقانی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشیار مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۴- دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* صندوق پستی ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵، shadaram@kntu.ac.ir

چکیده- یکی از روش‌های نوین در زمینه کنترل فعال جریان استفاده از عملگر پلاسمایی است که به وسیله تزریق مومنتوم به لایه مرزی سبب جلوگیری از وقوع پدیده جدایش می‌شود. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی عددی و تجربی ایرفویل NLF0414 تحت تاثیر نیروهای حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی می‌باشد. برای این منظور، ایرفویل مذکور تحت جریان هوای عبوری با سرعت ۲۵m/s و زوایای حمله مختلف، در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی، به هر دو صورت عددی و تجربی شبیه‌سازی می‌شود تا میزان و چگونگی تاثیر حضور عملگر پلاسمایی بر روی جریان به‌خوبی بررسی شود. این بررسی نشان داد که حضور عملگر پلاسمایی بر روی سطح ایرفویل و در نزدیکی شروع جدایش سبب جابه‌جا شدن نقطه جدایش از $x=16\text{mm}$ به $x=41\text{mm}$ در زاویه حمله ۱۸ درجه می‌شود. این میزان تاخیر در شروع جدایش بر روی سطح ایرفویل سبب افزایش ۳۵ درصدی نسبت ضریب نیروی برا به ضریب نیروی پسا و یا در حقیقت بازده ایرفویل در این زاویه حمله می‌شود.

کلیدواژگان: عملگر پلاسمایی، روش فعال کنترل جریان، نقطه جدایش، زاویه استال

Numerical and experimental investigation on the effect of a plasma actuator on NLF0414 airfoils' efficiency after the stall

A. Salmasi¹, A. Shadaram^{2*}, M. Mirzaei³, A. Shams Taleghani⁴

1- MSc. Student, Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

3- Assoc. Prof., Aerospace Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

4- PhD, Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

* P. O. B. 15875-4416 Tehran, shadaram@kntu.ac.ir

Abstract- Plasma actuator is one of the newest devices in flow control techniques which can delay separation by inducing external momentum to the boundary layer of the flow. The purpose of this paper is to simulate a NLF0414 airfoil both experimentally and numerically in presence of the body force vector induced by a specific plasma actuator. For this reason, the simulation is done both numerically and experimentally for a NLF0414 airfoil with the compressible 25m/s velocity airflow in two different cases: with no plasma actuator located on the airfoil and with body force produced by a plasma actuator located on the top of the airfoil in order to investigate the effect of plasma on the flow passing over it. The results showed that presence of a plasma actuator on the top surface of the airfoil, close to the separation point, transferred the separation point from $x=16\text{ mm}$ to $x=41\text{ mm}$ at the angle of attack of 18 degrees. This separation delay caused a 35% increase in the ratio of lift to drag coefficient or the efficiency of the airfoil in the same angle of attack.

Keywords: Plasma Actuator, Active Flow Control Method, Separation Point, Stall Angel

۱- مقدمه

توانایی کنترل جریان، به منظور ایجاد تغییری دلخواه، دارای اهمیت تکنولوژیکی و کاربردی قابل ملاحظه‌ای است. در حال حاضر، بدون شک، این مطلب بیش از هر موضوع دیگری در علم مکانیک سیالات توسط محققان و مهندسان دنبال می‌شود تا به روش‌هایی با کارایی بهتر و هزینه‌های کمتر جهت کنترل جریان دست پیدا کنند. به همین دلیل، تحقیقات گسترده‌ای بر روی روش‌های مختلف فعال و غیرفعال کنترل جریان انجام شده و همچنان نیز ادامه دارد.

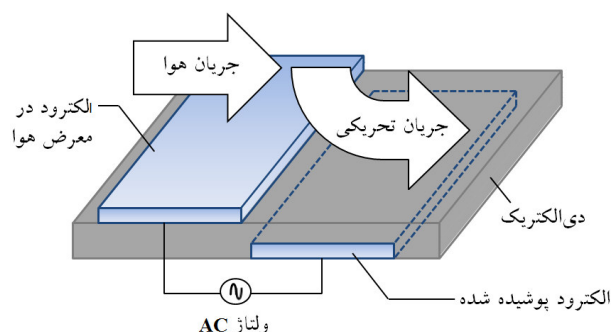
عملگر پلاسمایی تخلیه مانع دی‌الکتریک سطحی^۱ یکی از روش‌های مطرح در زمینه کنترل فعال جریان می‌باشد. این عملگر به دلیل مزایای ارزشمند خود در زمینه کنترل جریان، مورد توجه بسیاری از محققان، به‌ویژه در دهه اخیر، قرار گرفته است. از جمله ویژگی‌های مهم این عملگر پلاسمایی می‌توان به نداشتن قطعات متحرک، قابلیت پاسخگویی سریع و تاخیر زمانی اندک، سادگی ساختار، مصرف کم انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی، تکمیل و تعمیر اشاره نمود.

به دلیل مزایای گفته‌شده در مورد عملگرهای پلاسمایی، امروزه تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از این نوع عملگرها به منظور کنترل لایه مرزی جریان انجام گرفته است و همچنان نیز در حال انجام است. ملیک و همکارانش [۱] نخستین کسانی بودند که از نیروی جت حاصل از یک تخلیه توسط جریان مستقیم به منظور ایجاد یک ناحیه پلازما و در نهایت کاهش نیروی پسا بر روی صفحات تخت استفاده کردند. پس از آن‌ها افراد مختلفی از عمل تخلیه الکتریکی به منظور تولید بردار نیروی حجمی و کنترل جدایش لایه مرزی جریان و افزایش نیروی برا بر روی اجسام مختلف استفاده کردند.

فرت و همکارانش [۲] از جمله محققانی هستند که به بررسی تاثیر استفاده از عملگر پلاسمایی بر جریان عبوری از روی ایرفویل‌ها پرداختند. آن‌ها در زمینه‌هایی چون تاثیرات هندسه، جنس الکترودها، ولتاژ ورودی، فرکانس و پارامترهای دیگر عملگر پلاسمایی تحقیقات زیادی انجام داده‌اند. همچنین افرادی چون کرک و همکارانش [۳] تاثیر عملگر پلاسمایی را بر بال‌های چندجزئی و بال‌هایی با سطوح کنترلی متحرک بررسی کرده‌اند. آن‌ها در بررسی‌هایشان دریافتند که استفاده از

این نوع عملگر سبب افزایش قابل توجهی در نیروی برا بر روی ایرفویل می‌شود.

عملگر پلاسمایی به طور کلی از دو الکتروستاتیکی شکل تشکیل شده است که توسط یک عایق دی‌الکتریک از یکدیگر جدا شده‌اند. چینش الکترودها به صورت کاملاً نامتقارن و با اندکی (در مقیاس میلی‌متری) روی هم افتادگی می‌باشد. یکی از الکترودها (الکتروستاتیکی فوقانی) در معرض هوا قرار گرفته و دیگری (الکتروستاتیکی پایینی) نیز کاملاً توسط یک ماده دی‌الکتریک پوشیده شده است. نمایی ساده از این عملگر پلاسمایی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایی از یک عملگر مانع تخلیه دی‌الکتریک سطحی

زمانی که الکترودها به وسیله یک ولتاژ متناوب تغذیه شوند، عبور این ولتاژ سبب یونیزه‌شدن ذرات هوا در بالای الکتروستاتیکی پوشیده از عایق و تشکیل پلازما می‌شود. در اثر میدان الکتریکی حاصل از عبور جریان، ذرات یونیزه‌شده سبب ایجاد یک بردار نیروی حجمی می‌شوند که هوای بدون بار را تحت تاثیر قرار می‌دهند. به عبارت دیگر، نیروی حجمی تولیدشده مکانیزمی جهت کنترل فعال جریان است که می‌تواند به صورت دائم یا غیردائم، مشخصه‌های سرعت سیال را تحت تاثیر قرار دهد. در حقیقت طراحی نامتقارن این عملگر پلاسمایی است که به وسیله تولید نیروی حجمی سبب ایجاد جریانی می‌شود که بسیار شبیه جریانی است که توسط یک جت ایجاد می‌شود. در نهایت بردار نیروی ایجادشده سبب شتاب‌گیری ناگهانی جریان مجاور دیواره یا، به عبارت دیگر، تزریق ممنوم به سیال می‌شود [۳-۶].

مدلسازی عددی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی هنوز هم یکی از چالش‌های مطرح در این زمینه است. تاکنون مدل‌های مختلفی جهت مدلسازی توزیع نیروی حجمی حاصل

1. AC Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator

از عملگر ارائه شده و هنوز هم در حال توسعه است. این مدل‌ها شامل محدوده متنوعی از روش‌ها می‌باشند که شامل ساده‌ترین مدل‌ها، که در آن‌ها از فرض خطی بودن توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر استفاده می‌شود، تا پیچیده‌ترین آن‌ها می‌باشد. یکی از ساده‌ترین مدل‌ها جهت شبیه‌سازی عددی نیروی حجمی ناشی از عملگر پلاسمایی توسط شای و همکارانش [۷] ارائه شد که در آن از یک توزیع خطی متوسط زمانی جهت شبیه‌سازی بردار نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی استفاده می‌شود و مقدار آن به اندازه الکترودها، فرکانس، ولتاژ ورودی عملگر و برخی از خواص ثابت هوا بستگی دارد [۸،۷]. آن‌ها در این مدل به طریق تجربی دریافتند که تأثیرات پلاσμα فقط بر روی سطح فوقانی الکترودها پوشیده از ماده دی‌الکتریک قابل توجه است. علاوه بر این، آن‌ها دریافتند که شدت پلاσμα بر روی لبه الکترودها در معرض هوا بیشترین مقدار را داشته و این مقدار با افزایش شدت میدان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها، با استفاده از این مشاهدات و همچنین صرف‌نظر کردن از سایر عواملی که بر شدت پلاσμα تأثیرگذار است، مدلی ارائه کردند که بر اساس آن نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی فقط در یک ناحیه مثلثی کوچک در بالای الکترودها پوشیده شده تشکیل می‌شود و نیروی حجمی اعمال شده توسط عملگر نیز فقط در این ناحیه به سیال اعمال می‌شود. با وجود سادگی اعمال این روش، تحقیقات تجربی انجام گرفته نشان می‌دهد که فرض خطی بودن توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر انطباق مناسبی با فیزیک حاکم بر پدیده حاصل از عملگر پلاسمایی نداشته و در نتیجه از دقت مناسبی جهت مدلسازی این پدیده برخوردار نیست [۹].

یکی دیگر از مدل‌های معرفی شده جهت مدلسازی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی توسط سوزن و همکارانش [۹،۵] ارائه شد. آن‌ها در این مدل، به کمک حل توزیع فضایی پتانسیل الکتریکی و چگالی بار در اطراف عملگر که به عنوان تابعی از مقدار ولتاژ ورودی عملگر، هندسه (طول و ضخامت الکترودها) و خواص ماده دی‌الکتریک تعریف می‌شوند؛ توزیع نیروی حاصل از عملگر را به صورت واقع‌گرایانه‌تری مدلسازی کردند. آن‌ها در این مدل، نیروی حجمی حاصل را به صورت تابعی از ولتاژ اعمالی تعریف کرده و سپس در معادلات نویراستوکس جایگذاری کردند. به دلیل نزدیک‌تر بودن نتایج

حاصل از این مدل به نتایج تجربی حاصل، در این تحقیق از مدل سوزن و همکارانش [۹،۵] جهت شبیه‌سازی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی استفاده می‌شود.

تاکنون تحقیقات محدودی در زمینه استفاده از عملگر پلاسمایی جهت کنترل جریان انجام گرفته است که اکثر آن‌ها در مورد موضوعاتی چون کنترل جدایش لایه مرزی جریان آرام [۱۰]، کنترل و کاهش میزان سروصدا [۱۲،۱۱] و همچنین کنترل استال دینامیکی بر روی ایرفویل‌ها [۱۴،۱۳] بوده است. اکثر تحقیقات انجام گرفته بر روی عملگرهای پلاسمایی در اعداد رینولدز پایین انجام گرفته و جریان‌های با اعداد رینولدز بالا را دربر نمی‌گیرد. بنابراین، هدف در این تحقیق استفاده از عملگر پلاسمایی به منظور کنترل جدایش لایه مرزی جریان آشفته در اعداد رینولدز بالا می‌باشد. همچنین، در این تحقیق، تأثیر حضور عملگر پلاسمایی بر روی یک ایرفویل مدل NLF0414 با زاویه استال بالا بررسی می‌شود که مبحث جدیدی در این زمینه بوده و تاکنون هیچ‌گونه بررسی بر روی این ایرفویل‌ها در حضور عملگر پلاسمایی انجام نشده است.

از طرفی، در این تحقیق، بررسی تأثیر حضور عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل مذکور با عدد رینولدز بالا، به هر دو صورت تجربی و عددی، انجام گرفته است تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ایرفویل با نتایج تجربی حاصل مقایسه شده و از صحت نتایج عددی اطمینان حاصل شود. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در این بررسی از مدل سوزن و همکارانش [۹،۵] جهت مدلسازی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی به صورت عددی استفاده شده و سپس نیروی حجمی حاصل بر روی سطح فوقانی ایرفویل و در فاصله ۹/۶mm از نوک ایرفویل، که محل تعبیه عملگر بر روی سطح فوقانی ایرفویل است، به سیال اعمال می‌شود تا بدین وسیله ممنتوم لایه مرزی جریان افزایش پیدا کرده و جدایش را بر روی سطح ایرفویل به تأخیر اندازد.

۲- شبیه‌سازی عددی نیروی حاصل از عملگر

برای تعیین توزیع نیروهای حجمی توسط مدل سوزن و همکارانش [۵]، مقدار نیروی حجمی حاصل از عملگر از رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\vec{f}_b = \rho_c \vec{E} \quad (1)$$

که در این رابطه e بار مقدماتی، n_0 چگالی پلاسمای زمینه، k ثابت بولتزمن^۴، T_i و T_e نیز به ترتیب دمای یون و الکترون می باشد. بنابراین، می توان از دو معادله مجزا برای فرمول بندی این دو پتانسیل استفاده کرد که اولی مربوط به میدان الکتریکی خارجی حاصل از ولتاژ اعمالی بر روی الکترودها:

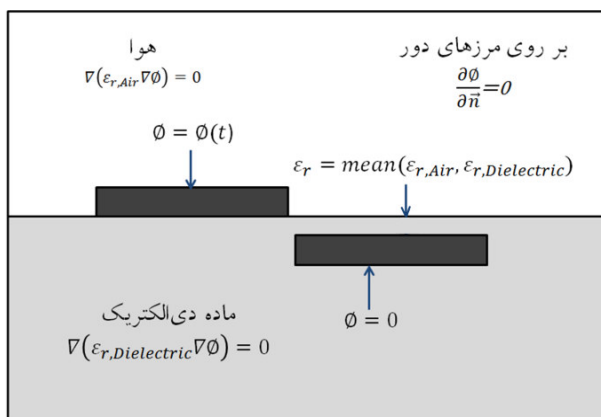
$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (۸)$$

و دیگری پتانسیل حاصل از ذرات باردار است.

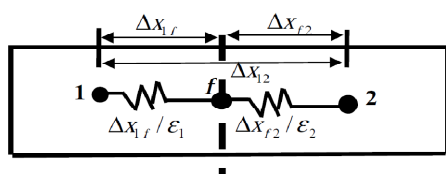
$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = -(\rho_c / \epsilon_0) \quad (۹)$$

در معادله (۸) از ولتاژ اعمالی بر روی الکترودها به عنوان شرایط مرزی برای یافتن توزیع پتانسیل الکتریکی (ϕ) استفاده می شود. شرایط مرزی و ناحیه محاسباتی برای معادله (۸) در شکل ۲ برای یک جفت الکترون نشان داده شده است.

معادله ۸ باید، با استفاده از شرایط مرزی نشان داده شده در شکل ۲ و همچنین مقدار مناسب ϵ_r برای هوا، حل شود. بر روی مرز میان هوا و دیواره نیز باید از میانگین مناسبی از ϵ_{r1} و ϵ_{r2} استفاده شود تا میدان الکتریکی، با دقت مناسبتری، شبیه سازی شود. شمایی از چگونگی محاسبه ϵ_r بر روی مرز میان هوا و دیواره در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲ ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی برای معادله (۸)



شکل ۳ نحوه محاسبه واحد اندازه گیری الکتریسیته بر حسب فاراد

بر روی مرز [۱۷]

اگر از تغییرات زمانی میدان مغناطیسی صرف نظر شود، که معمولاً در پلاسما نیز همین گونه است، معادلات ماکسول^۱ به صورت $\nabla \times E \approx 0$ خلاصه می شود [۱۶، ۱۵]. این بدین معناست که می توان میدان الکتریکی را از گرادیان یک پتانسیل عددی محاسبه کرد.

$$\vec{E} = -\nabla \Phi \quad (۲)$$

با استفاده از قانون گوس داریم:

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_c \quad (۳)$$

و یا:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi) = -\rho_c \quad (۴)$$

که در رابطه فوق ϵ واحد اندازه گیری الکتریسیته بر حسب فاراد^۲ است که می تواند به صورت زیر محاسبه شود.

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (۵)$$

در رابطه فوق، ϵ_r واحد اندازه گیری الکتریسیته نسبی متوسط و ϵ_0 واحد اندازه گیری الکتریسیته فضای آزاد است.

هرچند مشخص است که نیروی حجمی حاصل از معادله (۱) تاثیر زیادی بر روی میدان جریان دارد، اما هنوز هم تاثیرات افزایش دمای موضعی و کاهش لزجت بر روی لایه مرزی در این معادله لحاظ نشده است. محاسبات اخیر نشان می دهد که می توان از تاثیرات ناشی از تغییرات دما و لزجت بر روی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی صرف نظر کرده و ناحیه پلاسما را بیشتر شبیه به یک جمله منبع فرض کرد.

به دلیل اینکه ذرات گاز به سختی یونیزه می شوند، می توان ترم پتانسیل Φ را به دو قسمت مجزا تقسیم کرد: ترم اول شامل پتانسیل حاصل از میدان الکتریکی خارجی (ϕ) و ترم دوم که شامل پتانسیل حاصل از چگالی بار کل در ناحیه پلاسمایی (φ) است.

$$\Phi = \phi + \varphi \quad (۶)$$

اگر طول دمای^۳ کوچک و بار موجود بر روی دیواره بزرگ نباشد، می توان توزیع ذرات باردار در ناحیه پلاسما را توسط پتانسیل موجود بر روی دیواره مدل سازی کرد. طول دمای (λ_d) به صورت زیر تعریف می شود [۵]:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{e^2 n_0} \left[\frac{k T_i T_e}{T_i + T_e} \right]} \quad (۷)$$

1. Maxwell
2. Permittivity
3. Debye

سپس با استفاده از معادله (۷) می‌توان معادله (۱۶) را به صورت زیر خلاصه کرد:

$$\rho_c / \epsilon_o = (-1 / \lambda_d^2) \phi \quad (17)$$

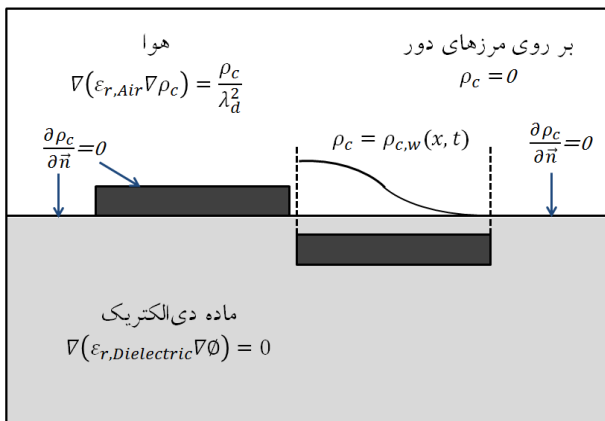
و متعاقباً پتانسیل الکتریکی نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\phi = (-\rho_c \lambda_d^2 / \epsilon_o) \quad (18)$$

با جایگذاری معادله (۱۸) در معادله (۹) رابطه‌ای بر حسب ترم‌های چگالی بار کل در هر نقطه در داخل پلاسما به دست می‌آید.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \rho_c) = \rho_c / \lambda_d^2 \quad (19)$$

برای یافتن ρ_c ، معادله (۱۹) باید فقط در ناحیه هوا و با شرایط مرزی نشان داده شده در شکل ۴ حل شود.



شکل ۴ ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی برای حل معادله (۱۹)

شرط گرادیان عمودی صفر برای چگالی بار کل بر روی تمامی دیواره‌های جامد، به جز ناحیه‌ای که توسط الکتروود پایینی در بر گرفته شده است، اعمال می‌شود و چگالی بار برای مرزهای خارجی نیز صفر در نظر گرفته می‌شود. در پایین دست الکتروود در معرض هوا، بالای ناحیه الکتروود پایینی، چگالی بار باید به صورتی تعریف شود که با تغییرات زمانی ولتاژ اعمال شده بر روی الکتروود فوقانی مطابقت کند.

$$\rho_{c,w}(x, t) = \rho_c^{\max} G(x) f(t) \quad (20)$$

که در رابطه فوق، $\rho_c^{\max}$ ماکزیمم مقدار مجاز چگالی بار در ناحیه (بر حسب Coulomb/m^3) است. تغییرات چگالی بار بر روی دیواره $\rho_{c,w}$ در جهت جریان (x) توسط یک تابع به نام $G(x)$ تعریف می‌شود، که $G(x)$ را می‌توان به گونه‌ای تعیین کرد که توزیع پلاسما بر روی الکتروود پایینی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند. مطالعات تجربی نشان می‌دهد که توزیع

در این شکل نقطه ۱ بر روی سمت هوا، نقطه ۲ بر روی سمت ماده دی‌الکتریک و نقطه f بر روی مرز میان هوا و ماده دی‌الکتریک قرار گرفته است. بر روی مرز، میدان الکتریکی نشان داده شده در شکل ۳ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{\phi_1 - \phi_2}{\left(\frac{\Delta x_{12}}{\epsilon_f} \right)} = \frac{\phi_1 - \phi_f}{\left(\frac{\Delta x_{1f}}{\epsilon_1} \right)} = \frac{\phi_f - \phi_2}{\left(\frac{\Delta x_{f2}}{\epsilon_2} \right)} \quad (10)$$

برای یافتن واحد اندازه‌گیری الکتریسیته مرز (ϵ_f) ، باید میان‌یابی مناسبی بین واحد اندازه‌گیری الکتریسیته هوا (ϵ_1) و واحد اندازه‌گیری الکتریسیته ماده دی‌الکتریک (ϵ_2) به نحو زیر انجام شود:

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 \frac{\Delta x_{f2}}{\Delta x_{12}} + \epsilon_2 \frac{\Delta x_{1f}}{\Delta x_{12}}} \quad (11)$$

ولتاژ مستقیم اعمال شده به الکتروود بالایی به عنوان شرایط مرزی عبارت است از:

$$\phi(t) = \phi^{\max} f(t) \quad (12)$$

تابع تولید موج را می‌توان به صورت یک موج سینوسی و به صورت رابطه زیر:

$$f(t) = \sin(2\pi\omega t) \quad (13)$$

و یا به صورت یک موج مربعی به صورت زیر فرض کرد:

$$f(t) = \begin{cases} 1 & \text{for } \sin(2\pi\omega t) \geq 0 \\ -1 & \text{for } \sin(2\pi\omega t) < 0 \end{cases} \quad (14)$$

که در رابطه فوق ω فرکانس و $\phi^{\max}$ دامنه موج می‌باشد.

بهتر است که الکتروود پایینی به عنوان زمین فرض شود تا بتوان مقدار پتانسیل الکتریکی بر روی آن را صفر در نظر گرفت. در مرزهای بیرونی نیز شرط $\partial\phi/\partial n = 0$ برقرار است. مقدار چگالی بار کل در هر نقطه در داخل پلاسما را نیز می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\begin{aligned} \rho_c / \epsilon_o &= e(n_i - n_e) / \epsilon_o \\ &\approx -\frac{en_o}{\epsilon_o} [\exp(e\phi/kT_i) + \exp(e\phi/kT_e)] \end{aligned} \quad (15)$$

که در این رابطه n_i و n_e به ترتیب چگالی یون و الکتروود در داخل پلاسما و ϕ پتانسیل الکتریکی موضعی است. با بسط توابع نمایی توسط سری‌های تیلور برای $\phi \ll T$ معادله (۱۵) به معادله زیر خلاصه می‌شود.

$$\frac{\rho_c}{\epsilon_o} = -\left(\frac{e^2 n_o}{\epsilon_o} \right) \left[\left(\frac{1}{kT_i} \right) + \left(\frac{1}{kT_e} \right) \right] \phi \quad (16)$$

پلازما شبیه توزیع نیمه‌گوسی^۱ است که توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۱۹، ۱۸، ۱۶]:

$$G(x) = \exp\left[-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2)\right] \quad \text{for } x \geq 0 \quad (21)$$

در معادله (۲۱) μ پارامتر مکان است که نمایانگر بیشینه مقدار مکانی x و σ پارامتر مقیاس است که به نرخ تباهی اشاره دارد. انتخاب مقدار بزرگی برای σ منجر به توزیع یکنواخت می‌شود. برای حل معادلات (۸) و (۱۹) باید مقادیر طول دمای (λ_d)، چگالی بار بیشینه بر روی دیواره (ρ_e) و پارامتر مقیاس برای توزیع چگالی بار (σ) تعیین شوند. این پارامترها را می‌توان بر اساس یک آزمایش تجربی ساده، که در آن یک جریان در حضور پلازما مورد بررسی قرار گرفته است، تعیین کرد. در این محاسبات، مقدار پارامتر مکان μ به گونه‌ای تعیین می‌شود که بیشترین مقدار آن بر روی لبه سمت چپ الکتروود پایینی رخ دهد. مقادیر فرکانس ω و دامنه ولتاژ $\phi^{\max}$ اعمالی نیز باید به صورت تجربی تعیین شوند.

زمانی که ϕ و ρ_e از حل معادلات (۸) و (۱۹) حاصل شد، بردار نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی نیز از رابطه (۱) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\vec{f}_b = \rho_e \vec{E} = \rho_e (-\nabla \phi) \quad (22)$$

و در نهایت، با حل رابطه (۲۲)، توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر به وسیله مدل سوزن و همکارانش حاصل می‌شود [۹، ۵]. در این بررسی، از نرم‌افزار فلوئنت^۲ جهت شبیه‌سازی عددی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی و اعمال آن به جریان اطراف ایرفویل استفاده شده است. علاوه بر این، جهت حل عددی معادلات حاکم بر جریان، از مدل توربولانس $k - \epsilon$ و همچنین فرمول‌بندی صریح درجه ۲ و روش حجم محدود برای گسسته‌سازی مکانی معادلات نویراستوکس استفاده می‌شود. همچنین مدل‌سازی مذکور در حالت جریان پایدار و با شرایط کاملاً مشابه تکرار شده است. علاوه بر این، از الگوریتم سیمپل^۳ جهت تلفیق سرعت و فشار استفاده شده است.

۳- نحوه انجام بررسی تجربی

به منظور مطالعه تجربی بررسی عددی انجام گرفته در این تحقیق، از یک تونل باد مدار باز با ابعاد سطح مقطع کاری

۱m × ۱/۲m در طول ۲/۵m استفاده شده است. سرعت قابل کنترل جریان آزاد در این تونل باد بین ۳m/s تا ۶۰m/s و شدت آشفتگی آن در حدود ۰/۱۵ درصد می‌باشد. ایرفویل مورد آزمایش در این تحقیق، مشابه مدل‌سازی عددی، یک ایرفویل مدل NLF0414 با طول وتر ۰/۴۵m و طول منظر ۱m می‌باشد که یک طرف آن با دیواره اتاق آزمایش و طرف دیگر آن با یک صفحه فلزی مقید شده است تا جریان دوبعدی باشد. به منظور اندازه‌گیری فشار حول ایرفویل از ۲۸ حفره فشاری روی سطح مکش ایرفویل و ۲۸ حفره در سطح فشار آن با قطرهای ۰/۸mm استفاده شده است. علاوه بر این، تمامی نتایج تجربی حاصل با اعمال سرعت ۲۵ m/s برای جریان عبوری از روی ایرفویل حاصل شده است تا با نتایج شبیه‌سازی عددی قابل مقایسه باشند.

قرائت همزمان فشارها توسط یک مبدل فشار الکترونیکی مدل DC005NDC4 ساخت شرکت هانی ول^۴ و یک کارت A/D ساخت شرکت نشنال اینسترومنت^۵ مدل PCI-6224 با یک مدول ۳۲کاناله انجام می‌شود. داده‌ها در فرکانس ۱kHz برای هر حفره فشار و در طول بازه زمانی ۲۰ ثانیه جمع‌آوری و متوسط‌گیری شده است. خطای اندازه‌گیری فشار نیز در حدود ۱ درصد می‌باشد.

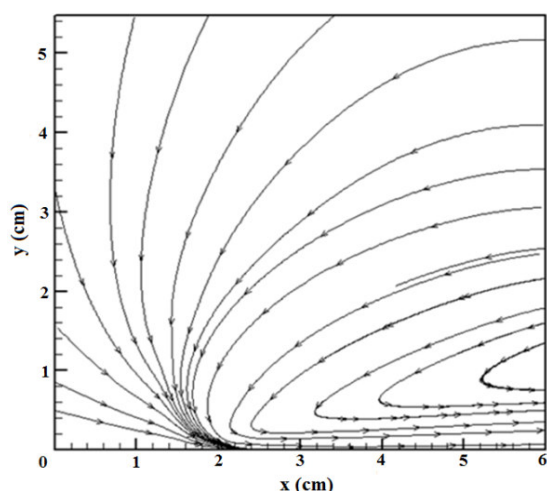
۴- بحث و نتایج

در ابتدا، به منظور حل عددی معادلات مربوط به مدل سوزن و همکارانش [۵] و یافتن توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی، مقادیر ثابت از مرجع شماره [۵] و به‌ترتیب برابر $\sigma = ۰/۳$ و $\rho_e^{\max} = ۰/۰۰۸ \text{ Coulomb/m}^3$ ، $\lambda_d = ۰/۰۱ \text{ m}$ انتخاب می‌شوند. همچنین، در این تحقیق فرض شده است که نیروی حجمی حاصل از پلازما در اثر یک موج مربعی با فرکانس $\omega = ۲۸ \text{ kHz}$ و دامنه $\phi_{\max} = ۱۴ \text{ kv}$ ایجاد می‌شود. ویژگی‌های هندسی عملگر پلاسمایی مورد استفاده در این تحقیق نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، دو الکتروود بالایی و زیرین به‌ترتیب دارای طول‌های ۱۰ mm و ۳۰ mm بوده و ضخامت هر یک نیز ۰/۵mm می‌باشد. علاوه بر این، جنس

4. Honeywell
5. National Instrument

1. Half Gaussian
2. Fluent
3. Simple



شکل ۷ جریان جت حاصل از عملگر در داخل جریان ساکن

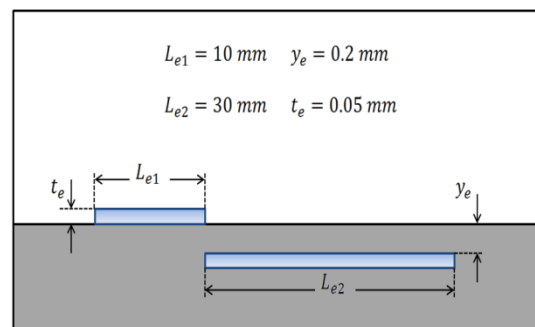
همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، حضور عملگر سبب ایجاد یک جت در داخل جریان ساکن شده و با تحت تاثیر قرار دادن ذرات سیال اطراف خود، آن‌ها را در جهت نیروهای حاصل شتاب داده و به حرکت وا می‌دارد.

پس از مدل‌سازی نیروی حجمی حاصل از عملگر، مدل‌سازی جریان بر روی ایرفویل NLF0414 آغاز می‌شود. در ابتدا جریان عبوری از روی ایرفویل بدون حضور نیروی خارجی ناشی از عملگر و در مرحله بعد تحت اعمال نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی مدل می‌شود. در حالت دوم، برای اعمال نیروی حجمی خارجی به جریان، توزیع نیروی به‌دست آمده به ترم نیروی خارجی موجود در معادلات ممنتوم افزوده شده و سپس اقدام به حل آن‌ها می‌شود.

این مدل‌سازی ابتدا بر روی ایرفویل با زاویه حمله ۱۸ درجه انجام می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، بررسی تجربی مشابه نیز بر روی یک ایرفویل با شرایط یکسان، یک بار بدون حضور عملگر و بار دیگر در حضور عملگر پلاسمایی، انجام می‌گیرد. به منظور مقایسه نتایج تجربی و عددی با یکدیگر و همچنین تایید نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، نمودار توزیع ضریب فشار بر روی سطح بالایی ایرفویل در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی در دو حالت تجربی و عددی در شکل ۸ نشان داده شده است.

نمودار ۸ نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مدل‌سازی ایرفویل در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی با نتایج حاصل از بررسی تجربی انجام گرفته بر روی ایرفویل به

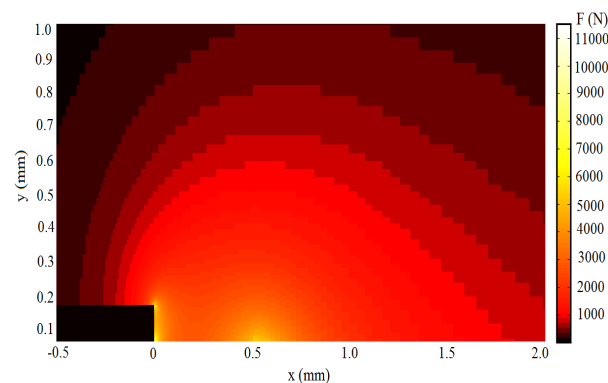
الکترودها از مس و جنس ماده دی‌الکتریک نیز از کاپتون و دارای $\epsilon_r = 2/7$ می‌باشد. برای هوا نیز $\epsilon_r = 1$ می‌باشد. محل قرارگیری این عملگر نیز در فاصله ۹/۶mm از نوک ایرفویل تعیین شده است.



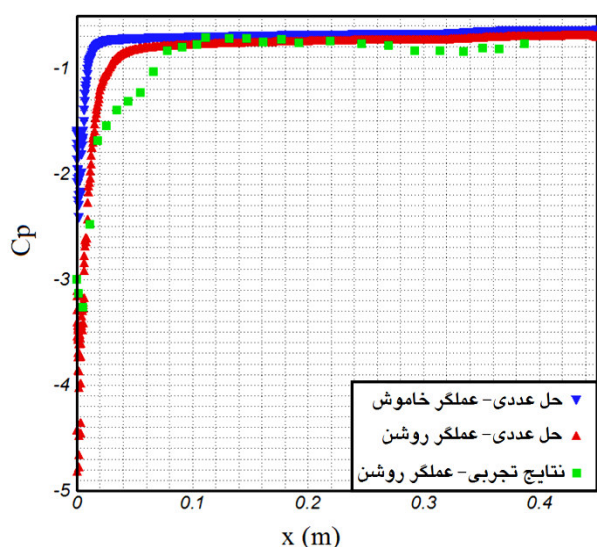
شکل ۵ شمایی از ویژگی‌های هندسی عملگر پلاسمایی

در نهایت، با استفاده از شرایط مرزی گفته شده، ویژگی‌های هندسی عملگر پلاسمایی و مدل سوزن و همکارانش، معادلات حاکم به صورت عددی مورد حل قرار گرفته و در نهایت توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی به صورت زیر حاصل می‌شود. شکل ۶ برآیند توزیع نیروی‌های حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی در راستای x و y، که توسط مدل سوزن و همکارانش حاصل شده است، را نشان می‌دهد.

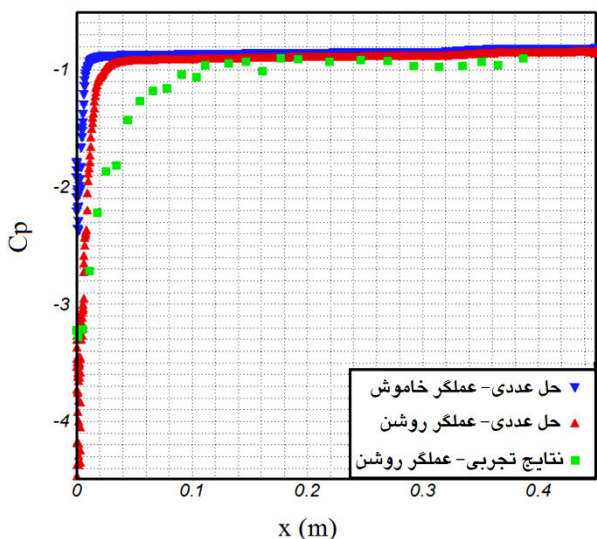
پس از محاسبه توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر، این توزیع نیرو به داخل یک جریان ساکن بر روی یک صفحه تخت بی‌نهایت اعمال می‌شود تا ابتدا چگونگی تاثیر آن بر جریان ساکن بررسی شود. شکل ۷ جریان جت حاصل از حضور عملگر پلاسمایی را در داخل یک جریان ساکن نشان می‌دهد.



شکل ۶ برآیند توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی در دو راستای x و y



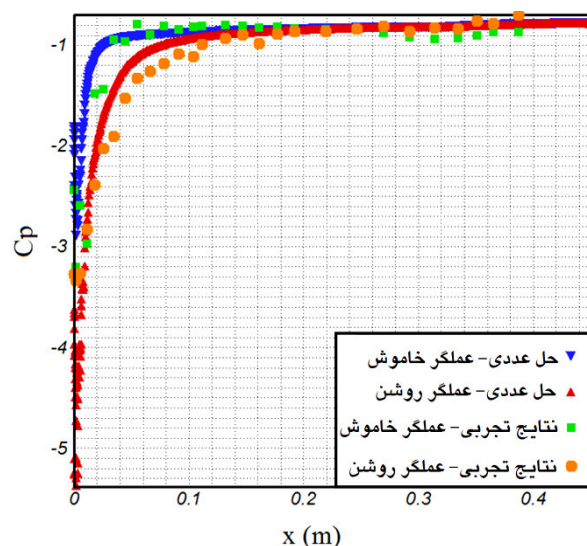
شکل ۹ مقایسه ضریب فشار بر روی سطح بالایی ایرفویل در حالت‌های تجربی و عددی در زاویه حمله ۲۰ درجه



شکل ۱۰ مقایسه ضریب فشار بر روی سطح بالایی ایرفویل در حالت‌های تجربی و عددی در زاویه حمله ۲۲ درجه

علاوه بر این شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ به خوبی نشان می‌دهند که حضور عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل سبب کاهش ضریب فشار بر روی سطح فوقانی ایرفویل شده و در نتیجه کارایی ایرفویل را افزایش می‌دهد. این افزایش کارایی حاصل از حضور عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل، در زاویه حمله ۱۸ درجه، به مراتب بیشتر از زوایای حمله ۲۰ و ۲۲ بوده که این امر نیز به

خوبی مطابقت داشته و در نتیجه می‌توان نسبت به صحت شبیه‌سازی انجام گرفته، جهت یافتن توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی و نحوه اعمال آن به جریان عبوری از روی سطح ایرفویل، اطمینان حاصل کرد.



شکل ۸ مقایسه ضریب فشار بر روی سطح بالایی ایرفویل در حالت‌های تجربی و عددی در زاویه حمله ۱۸ درجه

به منظور بررسی بیشتر، مدل‌سازی عددی ایرفویل در زوایای حمله ۲۰ و ۲۲ درجه بدون حضور عملگر پلاسمایی و در حضور عملگر پلاسمایی انجام گرفته و نتایج عددی حاصل به شکل مشابه با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نمودارهای ۹ و ۱۰ به ترتیب مقایسه میان ضریب فشار بر روی سطح فوقانی ایرفویل را در دو حالت تجربی و عددی در زوایای حمله ۲۰ و ۲۲ درجه نشان می‌دهند.

همان‌طور که از روی شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است، بررسی تجربی انجام گرفته در زوایای حمله ۲۰ و ۲۲ درجه فقط بر روی جریان اطراف ایرفویل و تحت تاثیر حضور عملگر پلاسمایی انجام گرفته است و در نتیجه، در این دو زاویه حمله، تنها نتایج عددی و تجربی حاصل از مدل‌سازی ایرفویل در حضور عملگر پلاسمایی با یکدیگر قابل مقایسه می‌باشند که مقایسه نتایج حاصل نیز حاکی از انطباق مناسب نتایج و در نتیجه صحت شبیه‌سازی‌های عددی انجام گرفته جهت محاسبه نیروهای حجمی حاصل از عملگر و اعمال آن به لایه مرزی اطراف ایرفویل می‌باشد.

حقیقت حضور عملگر پلاسمایی سبب ایجاد گرادیان فشار مثبت بزرگتر شده که این امر اثرات درهمی را کاهش داده و سبب تخریب گردابه‌های نوظهور می‌گردد.

اما همان‌طور که از روی شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، میزان تاثیر حضور عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل با افزایش زاویه حمله روند کاهشی دارد. برای توجیه این مطلب باید به این نکته توجه کرد که همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، با افزایش زاویه حمله، جدایش بر روی سطح ایرفویل زودتر اتفاق افتاده و در نتیجه ناحیه آشفتگی و تشکیل گردابه‌های ریز در پشت ایرفویل نیز گسترش می‌یابد. بنابراین، در زوایای حمله بزرگتر آشفتگی جریان عبوری از روی ایرفویل افزایش و در نتیجه میزان کارایی ایرفویل کاهش قابل توجهی می‌یابد.

این در حالی است که مقدار نیروی حجمی اعمال‌شده از عملگر پلاسمایی در هر سه زاویه حمله فوق ثابت و با یکدیگر برابر است. بنابراین نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی در زوایای حمله بزرگتر قادر نخواهد بود که جدایش را به همان میزان زوایای حمله کوچک‌تر به تاخیر اندازد و بنابراین می‌توان به این صورت نتیجه‌گیری کرد که در زوایای حمله بزرگتر، به دلیل افزایش ناحیه گردابه‌ای در پشت ایرفویل، میزان قدرت عملگر پلاسمایی برای غلبه بر این ناحیه درهمی گسترش یافته، کاهش می‌یابد.

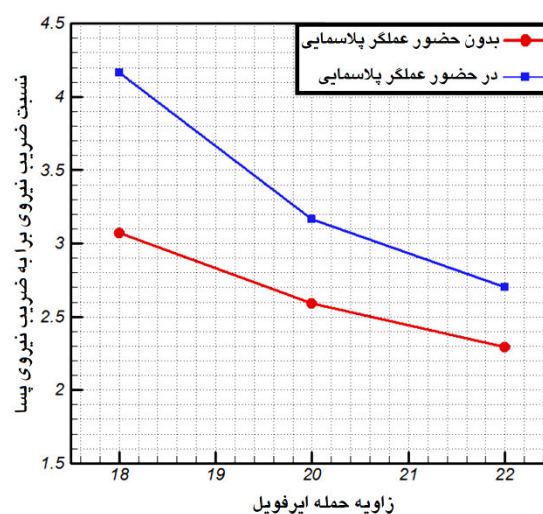
به دلیل اینکه حضور عملگر پلاسمایی در زاویه حمله ۱۸ درجه بیشترین تاثیر در افزایش کارایی ایرفویل را نسبت به دو زاویه حمله دیگر دارد، چگونگی تاثیر عملگر پلاسمایی بر روی برخی از خواص جریان در زاویه حمله ۱۸ درجه در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

شکل ۱۲ خطوط جریان عبوری از روی ایرفویل در زاویه حمله ۱۸ درجه را در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۲ به خوبی مشخص است، حضور نیروهای حجمی ناشی از عملگر پلاسمایی سبب تزریق ممنوم به لایه مرزی جریان عبوری از روی ایرفویل و در نتیجه به تاخیر افتادن جریان برگشتی و تشکیل گردابه بر روی سطح فوقانی ایرفویل شده است. شکل ۱۳ نیز مقایسه میان کانتورهای ضریب فشار در اطراف ایرفویل در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر را در زاویه حمله ۱۸ درجه نشان می‌دهد.

معنای تاثیر بیشتر عملگر پلاسمایی در زاویه حمله ۱۸ درجه نسبت به دو زاویه حمله بزرگتر می‌باشد.

به منظور بررسی بیشتر بر روی تاثیر حضور عملگر پلاسمایی بر روی سطح ایرفویل، مقایسه‌ای میان نسبت ضریب نیروی برا به ضریب نیروی پسا در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل انجام گرفته است. این مقایسه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ نمودار نسبت ضریب نیروی برا به ضریب نیروی پسا بر حسب زاویه حمله ایرفویل در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی

همان‌طور که در شکل ۱۱ به خوبی مشخص است، در حالتی که از عملگر پلاسمایی بر روی سطح ایرفویل استفاده شده است، نسبت ضریب نیروی برا به ضریب نیروی پسا بیشتر از این نسبت در حالتی است که عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل حضور ندارد. این امر نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسمایی منجر به کاهش نیروی پسا و افزایش نیروی برا می‌شود.

علاوه بر این، همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، این افزایش کارایی در زاویه حمله ۱۸ درجه بیشترین مقدار را داشته و برابر با ۳۵ درصد می‌باشد. افزایش کارایی ایرفویل برای زوایای حمله ۲۰ و ۲۲ درجه نیز به ترتیب برابر ۲۲ درصد و ۱۷ درصد می‌باشد. افزایش قابل ملاحظه کارایی ایرفویل در حضور عملگر پلاسمایی نشان‌دهنده تاثیر عملگر پلاسمایی در کاهش اثرات درهمی جریان و تلفات ناشی از آن می‌باشد. در

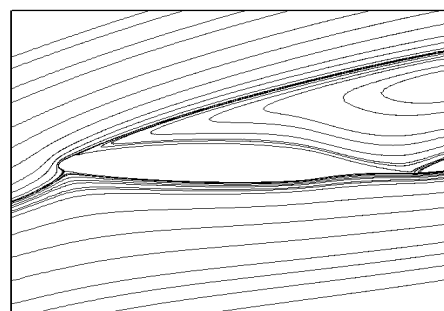
کانتورهای فوق به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسمایی و تزریق ممنتوم به لایه مرزی سطح فوقانی ایرفویل سبب کاهش ضریب فشار بر روی آن می‌شود و از آنجا که اختلاف میان ضریب فشار بر روی سطح بالایی و پایینی ایرفویل تعیین‌کننده میزان کارایی ایرفویل می‌باشد، مشخص است که حضور عملگر سبب افزایش کارایی ایرفویل می‌شود.

به منظور واضح‌تر شدن میزان تزریق ممنتوم خارجی به لایه مرزی جریان اطراف ایرفویل در حضور عملگر پلاسمایی، پروفیل سرعت جریان عبوری از روی سطح فوقانی ایرفویل در مقاطع مختلف، در زاویه حمله ۱۸ درجه و در دو حالت مختلف حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی، ترسیم شده است. پروفیل‌های سرعت جریان در مقاطع مختلف ۸، ۱۶، ۳۲ و ۴۱ میلی‌متری در شکل ۱۴ ترسیم شده است.

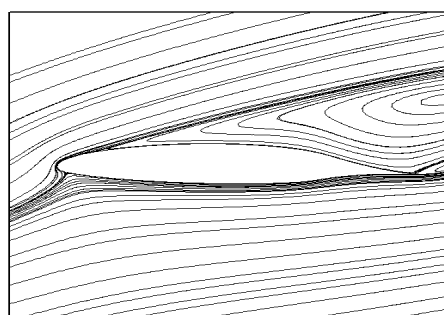
همان‌طور که از شکل ۱۴ مشخص است، میانگین سرعت جریان عبوری از روی ایرفویل در مقاطع مختلف، در حالتی که عملگر پلاسمایی بر روی سطح ایرفویل قرار ندارد، به طور قابل توجهی از این مقدار در حضور عملگر پلاسمایی و در مقاطع مشابه کمتر است. علاوه بر این، همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از عملگر پلاسمایی بر روی سطح فوقانی ایرفویل سبب تزریق ممنتوم خارجی به لایه مرزی جریان شده و همین امر سبب سرعت‌گرفتن جریان در داخل لایه مرزی جریان و به‌تأخیر افتادن شروع پدیده جدایش بر روی ایرفویل می‌شود.

شکل ۱۴ به خوبی نشان می‌دهد که نقطه شروع جدایش جریان بر روی ایرفویل، در حالتی که عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل تعبیه نشده است، تقریباً در فاصله $x=16\text{mm}$ از نوک ایرفویل رخ می‌دهد. این در حالی است که پس از استفاده از عملگر پلاسمایی نقطه شروع جدایش جریان بر روی سطح ایرفویل به مکان $x=41\text{mm}$ منتقل می‌شود. این بدین معناست که حضور عملگر پلاسمایی در زاویه حمله ۱۸ درجه سبب جابه‌جایی ۲۵mm نقطه جدایش جریان می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر بسیار چشمگیر حضور عملگر پلاسمایی در کاهش درهمی‌های جریان و به‌تأخیر انداختن شروع پدیده جدایش بر روی ایرفویل می‌باشد.

به طور کلی، می‌توان به این صورت نتیجه‌گیری کرد که حضور عملگر پلاسمایی و اعمال نیروی حجمی حاصل از تولید پلاسما سبب تزریق ممنتوم به ناحیه اطراف عملگر و درحقیقت

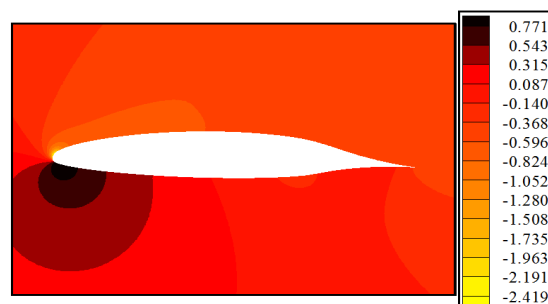


(الف)

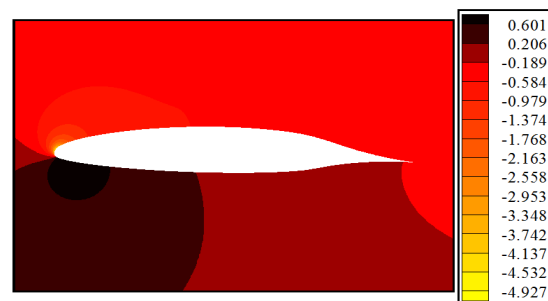


(ب)

شکل ۱۲ خطوط جریان عبوری از روی ایرفویل در زاویه حمله ۱۸ درجه در دو حالت (الف) عدم حضور عملگر پلاسمایی، (ب) حضور عملگر پلاسمایی



(الف)



(ب)

شکل ۱۳ کانتور ضریب فشار در اطراف ایرفویل در زاویه حمله ۱۸ درجه در دو حالت (الف) عدم حضور عملگر پلاسمایی، (ب) حضور عملگر پلاسمایی

نتایج حاصل از مدلسازی جریان عبوری از روی ایرفویل در حضور نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی نشان می‌دهد که این ابزار قادر است ناحیه جریان برگشتی بر روی ایرفویل را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسمایی، به دلیل کاهش ناحیه درهمی جریان، سبب افزایش نیروی برا و کاهش نیروی پسا شده و در نهایت کارایی ایرفویل را افزایش می‌شود.

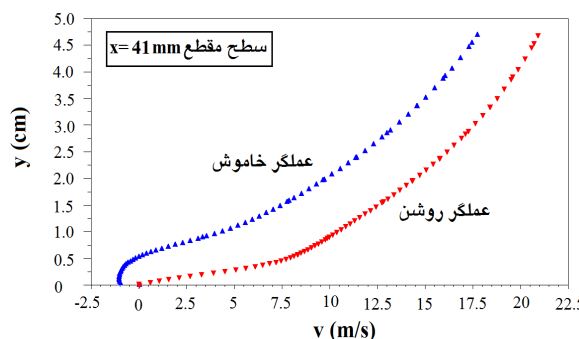
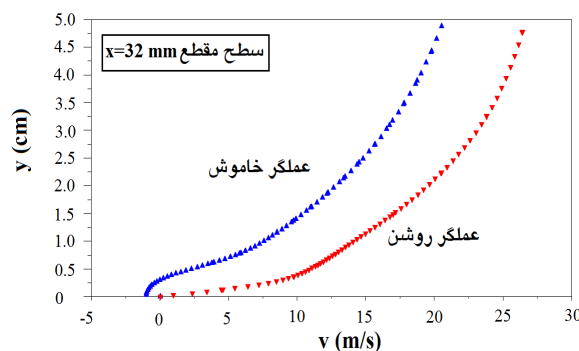
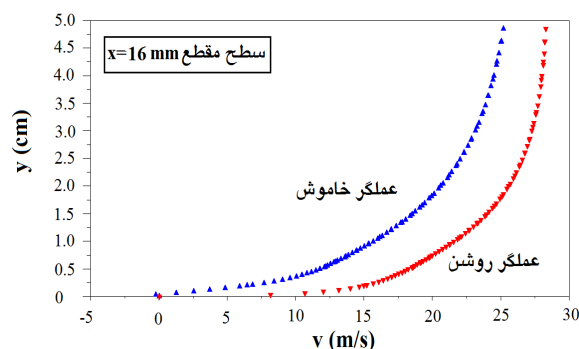
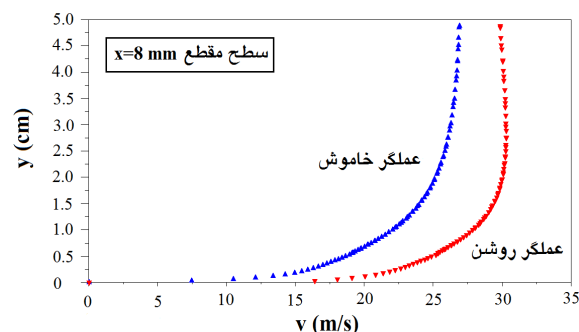
۵- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی میزان و چگونگی افزایش کارایی یک ایرفویل NLF0414 در زوایای حمله پس از زاویه استال با استفاده از یک عملگر پلاسمایی می‌باشد. برای این منظور، ابتدا توزیع نیروی حجمی حاصل از یک عملگر پلاسمایی به وسیله مدل سوزن و همکارانش مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و سپس به صورت ترم نیروی خارجی در معادلات ممنتوم مربوط به جریان عبوری از روی ایرفویل وارد گردید. در ابتدا نتایج حاصل از مدلسازی عددی با بررسی تجربی انجام گرفته بر روی مدل مشابه مورد مقایسه قرار گرفته و از صحت نتایج عددی اطمینان حاصل شد.

در ادامه، مقایسه میان نتایج عددی حاصل از مدلسازی جریان عبوری از روی ایرفویل در دو حالت مختلف حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی، همانطور که انتظار می‌رفت، نشان از افزایش قابل توجه کارایی ایرفویل در حضور عملگر پلاسمایی داشت. این افزایش کارایی ایرفویل در حضور عملگر پلاسمایی به حدی است که در زاویه حمله ۱۸ درجه نسبت ضریب نیروی برا به ضریب نیروی پسا در حالت حضور عملگر پلاسمایی بر روی سطح ایرفویل ۳۵ درصد، نسبت به جریان بدون حضور عملگر پلاسمایی، افزایش پیدا کرده است که درحقیقت میزان چشمگیری است. هر چند این میزان افزایش کارایی ایرفویل در زوایای حمله ۲۰ و ۲۲ درجه نسبت به زاویه حمله ۱۸ درجه کاهش یافته است. با این وجود نسبت ضریب نیروی برا به ضریب نیروی پسا در این زوایای حمله نیز افزایش قابل توجهی داشته و به ترتیب برابر ۲۲ درصد و ۱۷ درصد می‌باشد.

علاوه بر این، نتایج مدلسازی عددی نشان می‌دهد که استفاده از این عملگر می‌تواند نقطه شروع جدایش بر روی سطح ایرفویل را به میزان قابل توجهی جابه‌جا کند که این

سطح فوقانی ایرفویل می‌شود که همین امر باعث افزایش سرعت در لایه مرزی جریان شده و همان‌طور که پیش‌تر گفته شد سبب به‌تاخیر افتادن جدایش بر روی سطح ایرفویل می‌شود.



شکل ۱۴ پروفیل سرعت جریان عبوری از روی سطح فوقانی ایرفویل در مقاطع مختلف، در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی

- [3] Corke T. C., Post M. L., Orlov D. M., "Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications", *Review Article: Exp. Fluids*, Vol. 46, No. 1, 2008, pp. 1-26.
- [4] Jayaraman B., Cho Y., Shyy W., "Modeling of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator", *38th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference*, 2007.
- [5] Suzen Y. B., Huang P. G., Jacob J. D., Ashpis D. E., "Numerical Simulation of Plasma Based Flow Control Applications", *35th Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, Ontario, June, 2005.
- [6] Jayaraman B., Shyy W., "Modeling of Dielectric Barrier Discharge-Induced Fluid Dynamics and Heat Transfer", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 44, 2007, pp. 130-191.
- [7] Shyy W., Jayaraman B., Andersson A., "Modeling of Glow Discharge-Induced Fluid Dynamics", *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 11, 2002, pp. 6434-6443.
- [8] Jayaraman B., Shyy W., "Flow Control and Thermal Management using Dielectric Glow Discharge Concepts", *AIAA 2003-3712*, 2003.
- [9] Suzen Y. B., Huang P. G., "Simulations of Flow Separation Control using Plasma Actuators", *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno, NV, Jan 2006.
- [10] Jacob J. D., Ramakumar K., "Control of Laminar and Turbulent Shear Flows using Plasma Actuators", *4th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomenon*, Williamsburg, Virginia, 2005.
- [11] Thomas F., Kozlov A., Corke T., "Plasma Actuators for Cylinder Flow Control and Noise Reduction," *AIAAJ*, Vol. 46, No. 8, 2008, pp. 1921-1931.
- [12] Lin Y., Zhang X., Huang X., "The Use of Plasma Actuators for Bluff Body Broadband Noise Control", *Experiments in Fluids*, doi: 10.1007/S00348-009-0806-3, 2009.
- [13] Greenblatt D., Wagnanski I., "Parameters Affecting Dynamic Stall Control by Oscillatory Excitation", *AIAA Paper 1999-3121*, 1999.
- [14] Post M., Corke T., "Separation Control using Plasma Actuators: Dynamic Stall Vortex Control on Oscillating Airfoil", *AIAA journal*, Vol. 44, No. 12, 2006, pp. 3125-3135
- [15] Roth J. R., Sherman D. M., Wilkinson S. R., "Electrohydrodynamic Flow Control with a Glow-Discharge Surface Plasma", *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 7, 2000, pp. 1166-1172.
- [16] Enloe C. L., McLaughlin T. E., VanDyken R. D., Kachner K. D., Jumper E. J., Corke T. C., Post M., Haddad O., "Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator:

میزان جابه‌جایی در شروع نقطه جدایش در زاویه حمله ۱۸ درجه و سرعت ۲۵m/s از $x=16\text{mm}$ به $x=41\text{mm}$ می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که حضور عملگر پلاسمایی بر روی این ایرفویل در زاویه حمله ۱۸ درجه قادر است در حدود ۲۵mm شروع جدایش را به‌تأخیر اندازد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود واجب می‌دانند تا از بخش صنایع پیشرو در وزارت صنایع و معادن، که حمایت مالی در انجام این تحقیق را به عهده داشته‌اند، تقدیر و تشکر نمایند.

۷- علایم و نشانه‌ها

e	بار مقدماتی (C)
k	ثابت بولتزمن
n_e	چگالی الکترون (C/m^3)
n_i	چگالی یون (C/m^3)
n_o	چگالی پلاسمای زمینه (C/m^3)
T_e	دمای الکترون (K)
T_i	دمای یون (K)
ε	واحد اندازه‌گیری الکتریسیته (F)
ϕ	پتانسیل حاصل از میدان الکتریکی خارجی (v)
$\phi^{\max}$	دامنه موج (v)
φ	پتانسیل حاصل از چگالی بار کل (v)
Φ	پتانسیل کل (v)
λ_d	طول دبای (m)
ρ_e	چگالی بار (Coulomb/m^3)
ω	فرکانس (Hz)

۸- مراجع

- [1] Malik M., Weinstein L., Hussani M., "Ion Wind Drag Reduction", *AIAA 21st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, AIAA Paper 83-0231, 1983.
- [2] Forte M., Jolibois J., Moreau F., Touchard G., Gazalens M., "Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity- Application to Flow Control", *3rd AIAA Flow Control Conference*, AIAA Paper 2006-2863.

- [18] Enloe C. L., McLaughlin T. E., Font G. I., Baughn J. W., "Parameterization of Temporal Structure in a Single Dielectric Barrier Aerodynamic Plasma Actuator", *AIAA-2005-0564*, 2005.
- [19] Enloe C. L., McLaughlin T. E., VanDyken R. D., Fischer J. C., "Plasma Structure in the Aerodynamic Plasma Actuator", *AIAA-200-0844*, 2004.
- Geometric Effects", *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 3, 2004, pp. 595-604.
- [17] Le Beau R. P., Reasor D. A., Suzen Y. B., Jacob J. D., Huang P. G., "Unstructured Grid Simulations of Flow Separation Control Using Plasma Actuator", *18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, Miami, FL, 2007.