

بررسی عددی حضور و تأثیر مکان قراردعی عملگر پلاسمایی در افزایش کارایی ایرفویل

عاطفه سلماسی (کارشناس ارشد)

عبدالله شادآرام* (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

سیدآرش شمس طائفانی (استادیار)

پژوهشکده سامانه‌های فضانوردی، پژوهشگاه فضای ایران، تهران

مسعود میزایی (دانشیار)

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص. ۶۳-۵۵)
دوری ۳-۲، شماره ۱، ص. ۶۳-۵۵

توانایی کنترل جریان، یکی از نیازهای اساسی در علم مکانیک سیالات است که پیوسته توسط محققین دنبال می‌شود. یکی از روش‌های نوین در این حیطه استفاده از عملگرهای پلاسمایی است که به‌وسیله تزریق منتوم به لایه مرزی، سبب تأخیر در وقوع پدیده جدایش می‌شود. هدف از این بررسی، کنترل جریان عبوری از روی ایرفویل $NLF^\circ 414$ به کمک عملگر پلاسمایی است. برای این منظور ابتدا مدل‌سازی ایرفویل به هر دو صورت عددی و تجربی تحت شرایط کاملاً مشابه و زاویه حمله 18° درجه انجام می‌گیرد. در مرحله بعد، محل قرارگیری عملگر بر روی سطح ایرفویل در میزان به تأخیر انداختن پدیده جدایش به صورت عددی بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که حضور عملگر پلاسمایی درست در نوک ایرفویل بیشترین تأثیر را در به تأخیر انداختن پدیده جدایش داشته و سبب افزایش 10% نسبت ضریب نیروی برا به ضریب نیروی پسا (بازده ایرفویل) در این زاویه حمله می‌شود.

atesalmasi84@yahoo.com
shadaram@kntu.ac.ir
taleghani@ari.ac.ir
mirzae@kntu.ac.ir

واژگان کلیدی: عملگر پلاسمایی، روش فعال کنترل جریان، نقطه جدایش، لایه مرزی، زاویه استال.

۱. مقدمه

محققین نیز قرار گرفت و تحقیقات گسترده روی این نوع عملگرها و تأثیرشان بر کنترل جریان آغاز شد.

نتایج حاصل از به‌کارگیری عملگر پلاسمایی روی جریان عبوری از استوانه‌ی با عدد رینولدز 10^3 تا 10^4 ، حاکی از تأثیر چشمگیر این عملگر بر کنترل جریان و جلوگیری از وقوع پدیده جدایش بود.^[۳]

در سال 2004 ، نتایج حاصل از برانگیختگی پایدار برای تأثیر بر یک ایرفویل $663-078$ با اعداد رینولدز بین $10^3 \times 77$ تا $10^4 \times 333$ به خوبی نشان داد که حضور عملگر پلاسمایی سبب کنترل جدایش جریان شده و منجر به افزایش 40% درصدی بازده ایرفویل می‌شود.^[۴] سپس محققین دیگری این بررسی‌ها را با ایرفویل و شرایط مشابه، ولی با برانگیختگی ناپایدار تکرار کردند.^[۵] نتایج حاصله حاکی از آن بود که برانگیختگی ناپایدار به مراتب مؤثرتر از برانگیختگی پایدار بوده و تأثیر بیشتری در به تأخیر انداختن پدیده جدایش دارد.

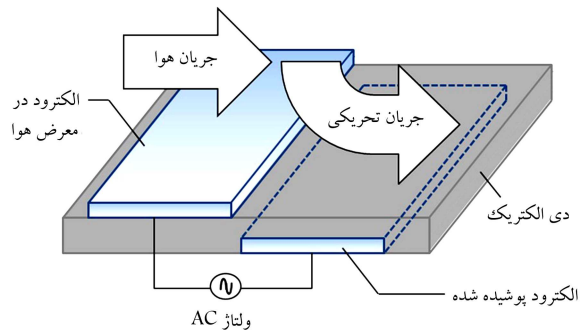
محققین ضمن بررسی تأثیر استفاده از عملگر پلاسمایی بر جریان عبوری از روی ایرفویل‌ها، در زمینه‌هایی چون تأثیرات هندسه، جنس الکترودها، ولتاژ ورودی، فرکانس و دیگر پارامترهای عملگر پلاسمایی تحقیقات زیادی انجام داده‌اند.^[۶]

یکی از نیازهای اساسی و کاربردی در علم مکانیک سیالات «توانایی کنترل جریان» است. در این خصوص، محققین و مهندسين بسیاری پیوسته برای ارائه روش‌هایی با بازده بالاتر و هزینه کم‌تر برای این منظور کوشیده‌اند. عملگر پلاسمایی تخلیه‌ی مانع دی‌الکتريک سطحی^۱ یکی از روش‌های مطرح در زمینه کنترل فعال جریان به شمار می‌رود. این عملگر ویژگی‌های مطلوب و دلخواه بسیار – نظیر نداشتن قطعات متحرک، سادگی ساختار، تأخیر زمانی اندک، مصرف کم انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی، تکمیل و تعمیر – دارد. برخورداری از این ویژگی‌ها، محققین و پژوهشگران بسیاری را برآن داشته تا تحقیقات گوناگونی در زمینه استفاده از این نوع عملگرها به منظور کنترل جریان انجام دهند.

در اولین اقدام، محققین با بهره‌گیری از «تخلیه‌ی مانع دی‌الکتريک سطحی» به منظور انتقال منتوم به لایه مرزی جریان، تأثیر این پدیده را بر کاهش نیروی پسا گزارش کردند.^[۱] به‌زودی عملگر معرفی شده در این بررسی مورد توجه دیگر

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۱۶، اصلاحیه ۱/۱۱/۱۳۹۱، پذیرش ۱۳۹۱/۱۲/۵.



شکل ۱. نمایی از یک عملگر مانع تخلیه‌ی دی الکتریک سطحی (عملگر پلاسمایی).

عملگر پلاسمایی به‌طور کلی از دو الکتروود مستطیلی، که توسط یک عایق دی الکتریک کاملاً از یکدیگر جدا شده‌اند، تشکیل شده است. چینش الکتروودها کاملاً نامتقارن است و اندکی (در مقیاس میلی‌متری) روی هم افتاده‌اند. یکی از الکتروودها (الکتروود فوقانی) در معرض هوا قرار گرفته و دیگری (الکتروود پایینی) نیز کاملاً توسط یک ماده‌ی دی الکتریک پوشیده شده است. نمایی ساده از این عملگر پلاسمایی در شکل ۱ نشان داده شده است.

زمانی که الکتروودها به‌وسیله‌ی یک ولتاژ متناوب تغذیه شوند، عبور این ولتاژ سبب یونیزه شدن ذرات هوا در بالای الکتروود پوشیده از عایق، و تشکیل پلازما می‌شود. بر اثر میدان الکتریکی حاصل از عبور جریان، ذرات یونیزه شده سبب ایجاد یک بردار نیروی حجمی می‌شوند که هوای بدون بار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نهایت بردار نیروی ایجاد شده سبب شتاب‌گیری ناگهانی جریان مجاور دیواره و به عبارتی، تزیق ممتوم به سیال می‌شود. [۷-۱۰]

تاکنون تحقیقات مختلفی در خصوص عملگرهای پلاسمایی انجام گرفته، که تأثیر حضور عملگرهای پلاسمایی در کنترل میزان سر و صدا، [۱۱-۱۳] کنترل لایه‌ی مرزی جریان آرام [۱۴] و نیز کنترل جریان در توربوماشین‌ها [۱۵] از آن جمله است.

هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی تأثیر نیروهای حاصل از عملگر پلاسمایی بر جریان عبوری از روی ایرفویل NLF^o ۴۱۴ در عدد رینولدز $10^6 \times 0.75$ و زاویه‌ی حمله پس از واماندگی است. دلیل اصلی انتخاب ایرفویل NLF^o ۴۱۴ در این بررسی این است که تاکنون در خصوص تأثیر حضور عملگر پلاسمایی بر روی این ایرفویل هیچ‌گونه بررسی انجام نگرفته است. در این بررسی، مدل‌سازی جریان عبوری از روی ایرفویل به هر دو صورت تجربی و عددی، و با شرایط کاملاً مشابه صورت می‌گیرد. برای شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از روی ایرفویل و حل معادلات ناویر-استوکس نیز از مدل توربولانس $k-\epsilon$ استفاده می‌شود. [۱۶]

در این تحقیق، تأثیر حضور عملگر پلاسمایی روی ایرفویل NLF^o ۴۱۴ با عدد رینولدز بالا، به هر دو صورت تجربی و عددی بررسی می‌شود و با مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ایرفویل با نتایج تجربی از صحت نتایج عددی اطمینان حاصل می‌شود. همچنین تأثیر محل قراردادی عملگر پلاسمایی روی سطح فوقانی ایرفویل بر میزان کاهش درهمی جریان و به تأخیر انداختن پدیده‌ی جدایش جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شبیه‌سازی عددی از مدل سوزن و همکارانش [۹] برای مدل‌سازی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی استفاده می‌شود؛ سپس نیروی حجمی حاصل روی سطح فوقانی ایرفویل و در فواصل مختلف از نوک ایرفویل به سیال اعمال می‌شود تا بدین‌وسیله ممتوم لایه‌ی مرزی جریان افزایش یابد و جدایش را بر سطح ایرفویل به تأخیر اندازد.

۲. شبیه‌سازی عددی عملگر پلاسمایی

مدل‌سازی عددی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی هنوز هم یکی از چالش‌های مطرح در این زمینه است. تاکنون مدل‌های مختلفی برای مدل‌سازی توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر ارائه شده و همچنان نیز در حال توسعه است. این مدل‌ها شامل محدوده‌ی متنوعی از روش‌ها -- از ساده‌ترین مدل‌ها که از فرض خطی بودن توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر بهره می‌گیرند، تا پیچیده‌ترین آن‌ها -- است.

در یکی از ساده‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی عددی نیروی حجمی ناشی از عملگر پلاسمایی [۱۴] از یک توزیع خطی متوسط زمانی برای شبیه‌سازی بردار نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی استفاده می‌شود و مقدار آن به اندازه‌ی الکتروودها، فرکانس، ولتاژ ورودی و عملگر و برخی از خواص ثابت هوا بستگی دارد. [۱۴] در این مدل، محققین به طریق تجربی دریافتند که تأثیرات پلازما فقط بر روی سطح فوقانی الکتروود پوشیده از ماده دی الکتریک قابل توجه است؛ همچنین شدت پلازما روی لبه‌ی الکتروود در معرض هوا، بیشینه است و این مقدار با افزایش شدت میدان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها با استفاده از این مشاهدات، و بدون در نظر گرفتن سایر عوامل تأثیرگذار بر شدت پلازما، مدلی ارائه کردند که براساس آن نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی فقط در یک ناحیه‌ی مثلثی کوچک در بالای الکتروود پایینی 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، با فیزیک حاکم بر پدیده‌ی حاصل از عملگر پلاسمایی مطابقت چندانی ندارد و در نتیجه از دقت مناسبی برای مدل‌سازی این پدیده برخوردار نیست.

در یکی دیگر از مدل‌های معرفی شده برای مدل‌سازی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی، [۹] محققین به کمک حل توزیع فضایی پتانسیل الکتریکی و چگالی بار در اطراف عملگر -- که تابعی از مقدار ولتاژ ورودی عملگر، هندسه (طول و ضخامت الکتروودها) و خواص ماده‌ی دی الکتریک تعریف می‌شود -- 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 معادلات ناویر-استوکس جایگذاری کردند.

برای تعیین توزیع نیروهای حجمی توسط مدل سوزن و همکاران [۹] مقدار نیروی حجمی حاصل از عملگر از رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است:

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

اگر از تغییرات زمانی میدان مغناطیسی صرف‌نظر شود، که معمولاً در پلازما نیز همین‌گونه است، معادلات ماکسول به صورت $\nabla \times E \approx 0$ خلاصه می‌شود. [۱۷، ۱۸] این بدان معناست که می‌توان میدان الکتریکی را از گرادبان یک پتانسیل عددی محاسبه کرد.

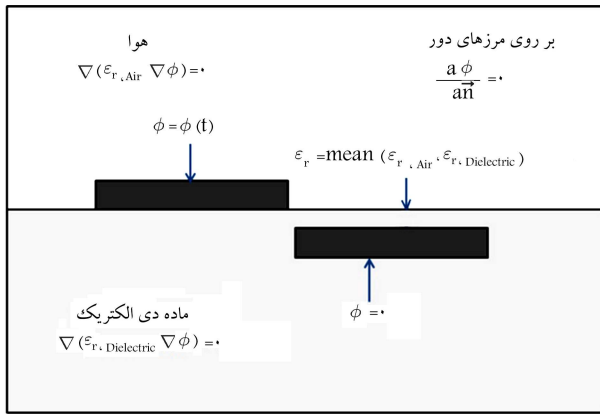
$$\vec{E} = -\nabla \Phi \quad (2)$$

و با استفاده از قانون گاوس:

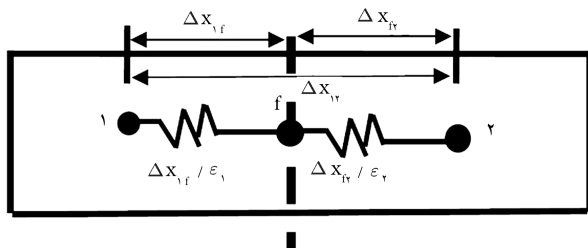
$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_c \quad (3)$$

یا:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi) = -\rho_c \quad (4)$$



شکل ۲. ناحیه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی برای معادله‌ی ۸.



شکل ۳. نحوه‌ی محاسبه‌ی واحد اندازه‌گیری الکتروسیسته برحسب فاراد، روی مرز [۱۷]

هوا و دیواره‌ی دی‌الکتریک، میدان الکتریکی نشان داده شده در شکل ۳ چنین 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 الکتروسیسته‌ی مرز (ϵ_f)، باید میان‌بایی مناسبی بین واحد اندازه‌گیری الکتروسیسته‌ی هوا (ϵ_1) و واحد اندازه‌گیری الکتروسیسته‌ی ماده‌ی دی‌الکتریک (ϵ_2) 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، به‌عنوان شرط مرزی، عبارت است از:

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

تابع تولید موج را می‌توان به‌صورت یک موج سینوسی و به‌صورت رابطه‌ی ۱۳:

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

یا به‌صورت یک موج مربعی فرض کرد:

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

در رابطه‌ی فوق ω فرکانس و ϕ^{\max} دامنه‌ی موج است. بهتر است الکتروود پایینی به‌عنوان زمین فرض شود تا بتوان مقدار پتانسیل الکتریکی روی آن را معادل صفر

که در رابطه‌ی فوق ϵ ضریب نفوذپذیری الکتریکی است و نشان‌دهنده‌ی مقاومتی است که ماده به‌هنگام قرارگیری در داخل یک میدان الکتریکی از خود نشان می‌دهد. این ضریب را می‌توان چنین محاسبه کرد:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (5)$$

در رابطه‌ی فوق ϵ_r واحد اندازه‌گیری الکتروسیسته نسبی متوسط و ϵ_0 واحد اندازه‌گیری الکتروسیسته فضای آزاد است.

اگرچه مشخص است که نیروی حجمی حاصل از معادله‌ی ۱ تأثیر چندانی بر میدان جریان دارد، هنوز هم تأثیرات افزایش دمای موضعی و کاهش لزجت بر لایه‌ی مرزی در این معادله لحاظ نشده است. محاسبات اخیر نشان می‌دهد که می‌توان از تأثیرات ناشی از تغییرات دما و لزجت بر نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی صرف‌نظر کرد و ناحیه‌ی پلازما را بیشتر شبیه به یک جمله منبع فرض کرد.

از آنجا که ذرات گاز به‌سختی یونیزه می‌شوند، می‌توان جمله‌ی پتانسیل Φ را به دو قسمت مجزا تقسیم کرد: جمله‌ی اول شامل پتانسیل حاصل از میدان الکتریکی خارجی (ϕ)، و جمله‌ی دوم شامل پتانسیل حاصل از چگالی بار کل در ناحیه‌ی پلاسمایی (φ) است:

$$\Phi = \phi + \varphi \quad (6)$$

اگر طول دبی کوچک و بار موجود روی دیواره بزرگ نباشد، می‌توان توزیع ذرات باردار در ناحیه‌ی پلازما را توسط پتانسیل موجود روی دیواره مدل‌سازی کرد. طول دبی (λ_d) چنین تعریف می‌شود:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{e^2 n_e} \left[\frac{kT_i T_e}{T_i + T_e} \right]} \quad (7)$$

که در آن e بار مقدماتی، n_e چگالی پلاسمای زمینه، k ثابت بولتزمن، T_i دمای یون، و T_e دمای الکتروود است. بنابراین می‌توان از دو معادله‌ی مجزا برای فرمول‌بندی این دو پتانسیل استفاده کرد که اولی مربوط به میدان الکتریکی خارجی حاصل از ولتاژ اعمالی بر روی الکتروودها:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (8)$$

و دیگری پتانسیل حاصل از ذرات باردار است.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \varphi) = -(\rho_c / \epsilon_0) \quad (9)$$

در معادله‌ی ۸ از ولتاژ اعمالی بر الکتروودها به‌عنوان شرایط مرزی برای یافتن توزیع پتانسیل الکتریکی (ϕ) استفاده می‌شود. شرایط مرزی و ناحیه‌ی محاسباتی برای معادله‌ی ۸ در شکل ۲ برای یک جفت الکتروود نشان داده شده است.

معادله‌ی ۸ با استفاده از شرایط مرزی نشان داده شده در شکل ۲، و نیز مقدار مناسب ϵ_r برای هوا (که برابر ۱ است) حل می‌شود. روی مرز میان هوا و دیواره نیز باید از میانگین مناسبی از ϵ_{r2} و ϵ_{r1} استفاده شود تا میدان الکتریکی با دقت مناسب‌تری شبیه‌سازی شود. شمایی از چگونگی محاسبه‌ی ϵ_r روی مرز میان هوا و دیواره در شکل ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۳ نقطه‌ی ۱ روی سمت هوا، نقطه‌ی ۲ روی سمت ماده‌ی دی‌الکتریک، و نقطه‌ی ۳ روی مرز میان هوا و ماده‌ی دی‌الکتریک قرار گرفته است. در مرز میان

در نظر گرفت. در مرزهای بیرونی نیز شرط $\frac{\partial \phi}{\partial m} = 0$ برقرار است. مقدار چگالی بار کل در هر نقطه در داخل پلازما را نیز می‌توان از رابطه‌ی ۱۵ محاسبه کرد:

$$\rho_c / \epsilon_0 = e(n_i - n_e) / \epsilon_0 \approx - \frac{e n_0}{\epsilon_0} [\exp(e\varphi / kT_i) + \exp(e\varphi / kT_e)] \quad (15)$$

که در آن n_e و n_i به ترتیب چگالی یون و الکترون در داخل پلازما، و φ پتانسیل الکتریکی موضعی است. با بسط توابع نمایی توسط سری‌های تیلور برای $\varphi \ll T$ معادله‌ی ۱۵ به معادله‌ی زیر خلاصه می‌شود:

$$\rho_c / \epsilon_0 = - \left(\frac{e^2 n_0}{\epsilon_0} \right) [(1/kT_i) + (1/kT_e)] \varphi \quad (16)$$

سپس با استفاده از معادله‌ی ۷ می‌توان معادله‌ی ۱۶ را خلاصه کرد:

$$\rho_c / \epsilon_0 = (-1 / \lambda_d^2) \varphi \quad (17)$$

که متعاقباً پتانسیل الکتریکی چنین دست می‌آید:

$$\varphi = (-\rho_c \lambda_d^2 / \epsilon_0) \quad (18)$$

با جایگذاری معادله‌ی ۱۸ در معادله‌ی ۹، رابطه‌ی ۱۹ برحسب ترم‌های چگالی بار کل در هر نقطه‌ی داخل پلازما به دست می‌آید.

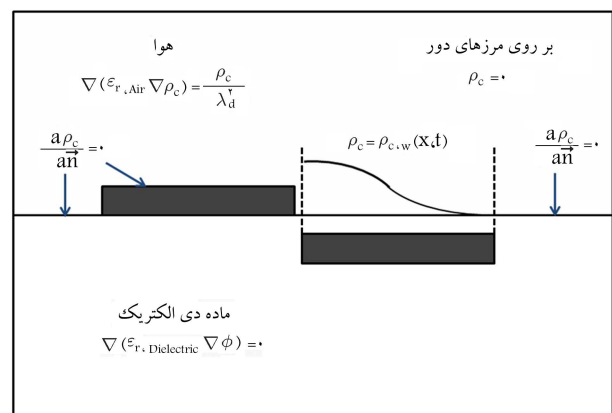
$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \rho_c) = \rho_c / \lambda_d^2 \quad (19)$$

برای یافتن ρ_c ، باید معادله‌ی ۱۹ را فقط در ناحیه‌ی هوا و با شرایط مرزی نشان داده شده در شکل ۴ حل کرد. [۱۹-۲۱]

شرط گرا دیان عمودی صفر برای چگالی بار کل روی تمامی دیواره‌های جامد، به جز ناحیه‌ی احاطه شده توسط الکترون پایینی، اعمال می‌شود؛ چگالی بار برای مرزهای خارجی نیز صفر در نظر گرفته می‌شود. در پایین دست الکترون در معرض هوا، بالای ناحیه‌ی الکترون پایینی، چگالی بار باید به صورتی تعریف شود که با تغییرات زمانی ولتاژ اعمال شده بر الکترون فوقانی مطابقت کند.

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

در رابطه‌ی فوق ρ_c^{\max} بیشترین مقدار مجاز چگالی بار در ناحیه (برحسب Coulomb/m^۲) است. تغییرات چگالی بار روی دیواره $\rho_{c,w}$ در جهت جریان



شکل ۴. ناحیه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی برای حل معادله‌ی ۱۹.

(x) توسط تابعی به نام $G(x)$ تعریف می‌شود که می‌توان آن را چنان تعیین کرد که توزیع پلازما روی الکترون پایینی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند. مطالعات تجربی نشان می‌دهد که توزیع پلازما شبیه توزیع نیمه‌گاوسی^۳ است که در قالب رابطه‌ی ۲۱ بیان می‌شود: [۱۸-۲۰]

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

که در آن μ پارامتر مکان است که نمایان‌گر بیشینه مقدار مکانی x و σ پارامتر مقیاس است که به نرخ تباهی اشاره دارد. انتخاب مقداری بزرگ برای σ منجر به توزیع یکنواخت $\rho_{c,w}$ می‌شود.

برای حل معادلات ۸ و ۱۹، باید نسبت به تعیین مقادیر طول دبی (λ_d)، چگالی بار بیشینه روی دیواره (ρ_c^{\max})، و پارامتر مقیاس برای توزیع چگالی بار (σ) اقدام شود. این پارامترها را می‌توان براساس یک آزمایش تجربی ساده تعیین کرد که در آن یک جریان در حضور پلازما مورد بررسی قرار گرفته است. در این محاسبات، مقدار پارامتر مکان μ به گونه‌ی تعیین می‌شود که بیشترین مقدار آن روی لبه‌ی سمت چپ الکترون پایینی رخ دهد. مقادیر فرکانس ω و دامنه‌ی ولتاژ ϕ^{\max} اعمالی نیز باید به صورت تجربی تعیین شود.

با حل معادلات ۸ و ۱۹ و محاسبه‌ی ϕ و ρ_c ، بردار نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی نیز از رابطه‌ی ۱ و مطابق رابطه‌ی ۲۲ محاسبه می‌شود: [۱۹]

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

در این بررسی، ابتدا پاسخ معادلات فوق در فضای اطراف عملگر به روش کدنویسی به دست آمده و سپس به کمک نرم‌افزار Fluent نیروهای حجمی حاصل، به جریان عبوری از روی یک ایرفویل دوبعدی اعمال شده و شبیه‌سازی انجام می‌شود. برای حل عددی معادلات حاکم بر جریان عبوری از مدل توربولانس $k - \epsilon$ و برای حل معادلات ناویر-استوکس از فرمول‌بندی صریح درجه ۲ استفاده می‌شود. مدل‌سازی مذکور در حالت جریان پایدار و با شرایط کاملاً مشابه تکرار شده است.

۳. نحوه‌ی انجام آزمایش

به منظور مطالعه‌ی تجربی درخصوص بررسی عددی انجام گرفته در این تحقیق از یک تونل باد مدار باز با ابعاد سطح مقطع کاری $1\text{m} \times 1.2\text{m}$ در طول 2.5m استفاده شده است. سرعت قابل کنترل جریان آزاد در این تونل باد بین 3m/s تا 60m/s ، و شدت آشفتگی آن در حدود 0.15% درصد است. ایرفویل مورد آزمایش در این تحقیق مشابه مدل‌سازی عددی، یک ایرفویل مدل $NLF0414$ با طول وتر 0.45m و طول منظر 1m است که یک طرف آن با دیواره‌ی اتاق آزمایش و طرف دیگر آن با یک صفحه‌ی فلزی مقید شده است تا جریان دوبعدی باشد. به منظور اندازه‌گیری فشار حول ایرفویل از 28 حفره‌ی فشاری روی سطح مکش ایرفویل و 28 حفره در سطح فشار آن با قطرهای 0.8mm استفاده شده است.

قرانت هم‌زمان فشارها توسط یک مبدل فشار الکترونیکی مدل Honeywell-DC005NDC4 و یک کارت A/D ساخت INSTRUMENT NATIONAL مدل PCI-6224 با یک مدول ۳۲ کاناله انجام می‌شود. داده‌ها در فرکانس 1kHz برای هر حفره‌ی فشار و در طول بازه زمانی 20 ثانیه جمع‌آوری و متوسط‌گیری شده است. خطای اندازه‌گیری فشار نیز در حدود 1% درصد است.

ویژگی‌های فوق و مدل سوزن و همکارانش به صورت عددی محاسبه شده است (شکل ۷). توزیع نیروی‌های حجمی حاصل از مدل سوزن و همکارانش در راستای x و y در شکل ۷ نشان داده شده است.

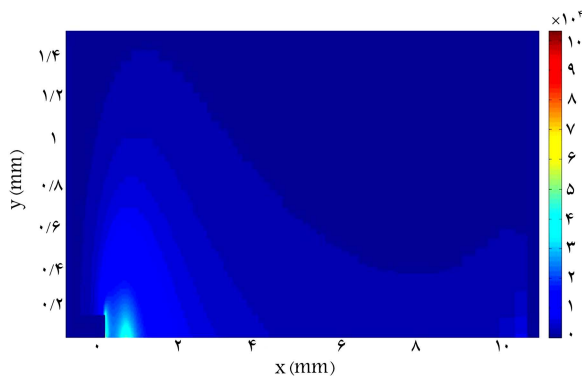
پس از مدل‌سازی نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی، مدل‌سازی جریان روی ایرفویل NLF^o ۴۱۴ آغاز می‌شود. در ابتدا جریان عبوری از روی ایرفویل بدون حضور نیروی خارجی ناشی از عملگر و در مرحله‌ی بعد تحت اعمال نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی مدل می‌شود. در حالت دوم، برای اعمال نیروی حجمی خارجی به جریان، توزیع نیروی به دست آمده را به جمله‌ی نیروی خارجی موجود در معادلات ممتوم افزوده، سپس نسبت به حل آن‌ها اقدام می‌شود.

این مدل‌سازی روی ایرفویل با زاویه‌ی حمله‌ی ۱۸ درجه انجام می‌شود که محل قرارگیری عملگر پلاسمایی روی ایرفویل در این حالت نقطه‌ی ۹٫۶mm از نوک ایرفویل تعیین شده است. چنان‌که پیش‌تر گفته شد بررسی تجربی مشابهی نیز روی یک ایرفویل با شرایط یکسان، یک بار بدون حضور عملگر و بار دیگر در حضور عملگر پلاسمایی، انجام می‌گیرد.

علت انتخاب زاویه‌ی حمله‌ی ۱۸ درجه برای بررسی جریان اطراف ایرفویل آن است که در این زاویه‌ی حمله، میزان درهمی و آشفتگی جریان عبوری از روی ایرفویل به حدی است که حضور عملگر پلاسمایی می‌تواند بیشترین تأثیر را در به تأخیر انداختن پدیده‌ی جدایش داشته باشد. این در حالی است که در زوایای حمله بیشتر به دلیل افزایش میزان درهمی جریان، توان عملگر نیز برای مقابله با این درهمی‌ها کاهش یافته و در نتیجه تأثیر عملگر در به تأخیر انداختن جدایش جریان بر روی ایرفویل نیز کم‌تر خواهد بود. به همین دلیل در این بررسی، تأثیر حضور عملگر پلاسمایی روی ایرفویل با زاویه‌ی حمله‌ی ۱۸ درجه انجام گرفته است.

به منظور مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی با یکدیگر و همچنین تأیید نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، نمودار توزیع ضریب فشار 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 روی ایرفویل به خوبی مطابقت دارد و در نتیجه می‌توان از صحت شبیه‌سازی انجام‌گرفته برای یافتن توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی و نحوه‌ی اعمال آن به جریان عبوری از روی سطح ایرفویل مطمئن شد. علاوه بر این نتایج



شکل ۷. برآیند توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی در دو راستای x و y .



شکل ۵. تصویری از محل نصب عملگر بر روی ایرفویل و تشکیل پلازما بر روی آن.

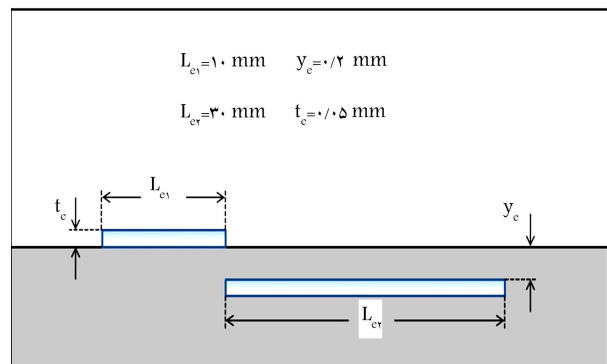
چنان‌که پیش‌تر نیز گفته شد، شرایط آزمایش تجربی به گونه‌ی تنظیم می‌شود که سرعت جریان عبوری از روی ایرفویل برابر 25 m/s ، و زاویه‌ی حمله‌ی ایرفویل نیز برابر ۱۸ درجه در نظر گرفته می‌شود. اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت در جریان دنباله به وسیله‌ی جریان‌سنج سیم داغ در تونل باد انجام گرفته است. محققین ضرایب درگ را در زوایای حمله‌ی مختلف محاسبه، و نیز میزان C_l با توزیع فشار حاصل را به طور کامل اندازه‌گیری کرده‌اند. [۲۳، ۲۴] تصویری از محل نصب عملگر بر روی ایرفویل و چگونگی تشکیل پلازما بر روی ایرفویل در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴. بحث و نتایج

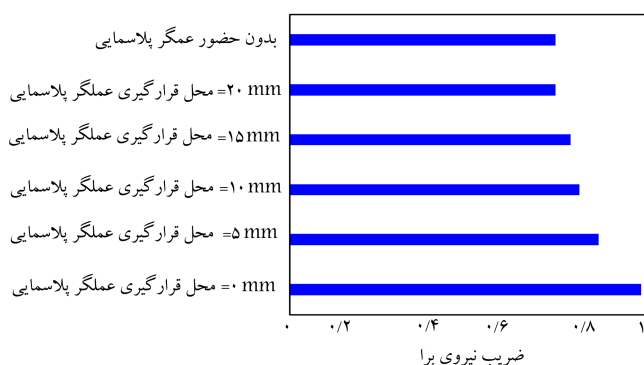
به منظور حل عددی معادلات مربوط به مدل سوزن و همکارانش [۵] و یافتن توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر، از مقادیر ثابت موجود [۵] استفاده می‌شود. همچنین در این تحقیق فرض شده است که نیروی حجمی حاصل از پلازما بر اثر یک موج مربعی با فرکانس $\omega = 28 \text{ kHz}$ و دامنه‌ی $\phi_{\text{max}} = 14 \text{ kV}$ ایجاد می‌شود. ویژگی‌های هندسی عملگر پلاسمایی مورد استفاده در این تحقیق نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

چنان‌که مشاهده می‌شود، طول دو الکترود بالایی و زیرین به ترتیب 10 mm و 30 mm ، و ضخامت آنها 0.5 mm است. علاوه بر این، جنس الکترودها از مس و جنس ماده‌ی دی‌الکتریک نیز از کاپتون است و مقدار الکتریسیته‌ی مرزی آن (ϵ_r) معادل ۲٫۷ است؛ برای هوا نیز $\epsilon_r = 1$ است.

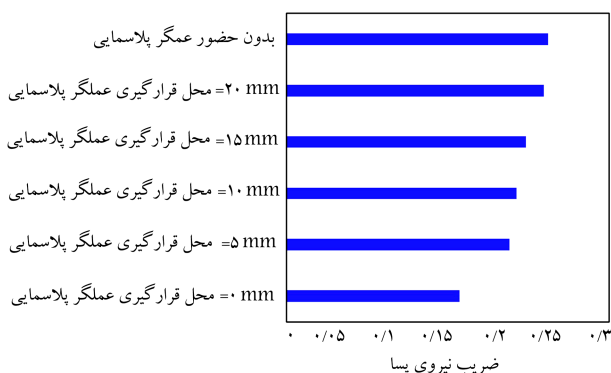
توزیع نیروی حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی با استفاده از شرایط مرزی،



شکل ۶. شمایی از ویژگی‌های هندسی عملگر پلاسمایی.



شکل ۹. نمودار ضریب نیروی برا روی ایرفویل برحسب محل قرارگیری عملگر پلاسمایی.

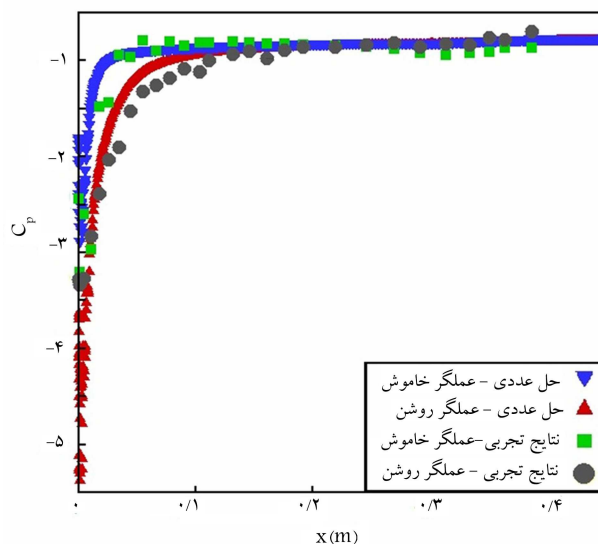


شکل ۱۰. نمودار ضریب نیروی پسا روی ایرفویل برحسب محل قرارگیری عملگر پلاسمایی.

در توجیه این نتایج می‌توان گفت هنگامی که ممنتوم خارجی ناشی از عملگر پلاسمایی درست در نوک ایرفویل به سیال تزریق می‌شود، به دلیل این که در این نقطه لایه مرزی جریان عبوری از روی ایرفویل بیشترین ممنتوم را دارد، با تزریق ممنتوم اضافی توانایی جریان در جابه‌جایی نقطه‌ی شروع جدایش و در نتیجه کاهش آشفتگی‌های جریان نیز بیشتر خواهد بود. این در حالی است که وقتی عملگر در فاصله‌ی بیشتر از نوک ایرفویل قرار داده می‌شود، به دلیل کاهش سریع‌تر ممنتوم در داخل لایه‌ی مرزی جریان، نسبت به حالتی که تزریق ممنتوم به سیال در فاصله‌ی نزدیک‌تر به نوک ایرفویل رخ می‌دهد، توانایی سیال نیز برای مقابله با آشفتگی‌های موجود در داخل جریان و در نتیجه توانایی آن در به تأخیر انداختن پدیده‌ی جدایش نیز کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۱ خطوط جریان عبوری از روی ایرفویل در زاویه‌ی حمله‌ی ۱۸ درجه، در دو حالت حضور عملگر پلاسمایی در نوک ایرفویل و عدم حضور عملگر پلاسمایی روی ایرفویل، نشان داده شده است. این نتایج ناشی از شبیه‌سازی عددی جریان اطراف ایرفویل است.

در شکل ۱۱ به خوبی مشخص است که حضور نیروهای حجمی ناشی از عملگر پلاسمایی سبب تزریق ممنتوم به لایه‌ی مرزی جریان عبوری از روی ایرفویل و در نتیجه به تأخیر افتادن جریان برگشتی و تشکیل گردابه روی سطح فوقانی ایرفویل شده است. در شکل ۱۲ نیز نتایج حاصل از مقایسه‌ی کانتورهای ضریب فشار در اطراف ایرفویل در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر، در زاویه‌ی حمله‌ی ۱۸ درجه، نشان داده شده است.



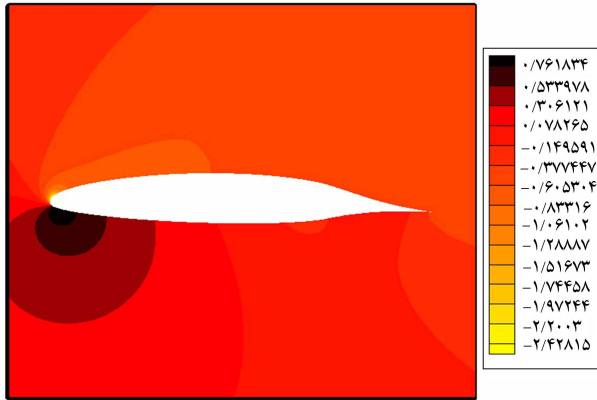
شکل ۸. مقایسه‌ی ضریب فشار روی سطح بالایی ایرفویل در حالت‌های تجربی و عددی در زاویه‌ی حمله‌ی ۱۸ درجه.

به خوبی نشان می‌دهد که حضور عملگر پلاسمایی سبب کاهش ضریب فشار روی سطح فوقانی ایرفویل شده است که این به معنی کاهش درهمی جریان روی ایرفویل و به تأخیر افتادن پدیده‌ی جدایش است. این امر در نهایت سبب افزایش راندمان ایرفویل می‌شود.

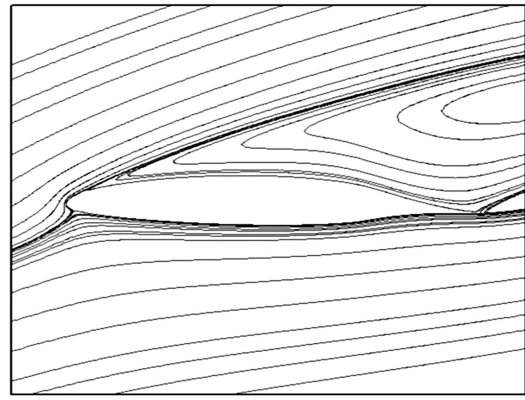
پس از شبیه‌سازی عددی جریان با حضور عملگر پلاسمایی در نقطه‌ی ۹/۶ mm از نوک ایرفویل، و مقایسه‌ی نتایج عددی با نتایج حاصل از کار تجربی و در حقیقت صحه‌گذاری بر کد نویسی انجام شده، می‌توان محل قرارگیری عملگر پلاسمایی روی سطح فوقانی ایرفویل را تغییر داده و تأثیرات آن را بر چگونگی و میزان به تأخیر انداختن پدیده‌ی جدایش بررسی کرد. برای این منظور نیروهای حجمی حاصل از عملگر در مکان‌های مختلفی از نوک ایرفویل قرار داده شده و تأثیر آن بر افزایش ضریب نیروی برا و کاهش ضریب نیروی پسا روی ایرفویل بررسی خواهد شد.

در این تحقیق، به منظور بررسی مکان بهینه برای قرارگیری عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل، ۵ محل انتخاب می‌شود که عبارت‌اند از فواصل: ۵ mm، ۱۰ mm، ۱۵ mm و ۲۰ mm از نوک ایرفویل که با جریان عبوری از روی ایرفویل بدون حضور عملگر پلاسمایی مقایسه می‌شوند. نمودارهای ضریب نیروی برا و ضریب نیروی پسا روی ایرفویل برحسب محل قرارگیری عملگر پلاسمایی به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

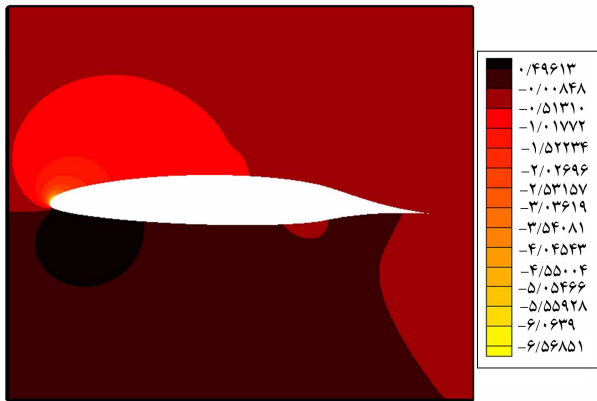
چنان که مشاهده می‌شود، در حالتی که عملگر پلاسمایی دقیقاً در نوک ایرفویل قرار دارد بیشترین ضریب نیروی برا و کم‌ترین ضریب نیروی پسا را دارد. با تغییر مکان قرارگیری عملگر و فاصله‌گرفتن آن از نوک ایرفویل به تدریج ضریب نیروی برا کاهش، و ضریب نیروی پسا افزایش می‌یابد. هنگامی که عملگر پلاسمایی در نقطه‌ی ۲۰ mm از نوک ایرفویل قرار گیرد ضریب نیروی برا کمینه، و ضریب نیروی پسا بیشینه می‌شود؛ به طوری که می‌توان گفت در حالتی که عملگر پلاسمایی در نقطه ۲۰ mm از نوک ایرفویل قرار می‌گیرد، تقریباً هیچ‌گونه تأثیری بر تأخیر جدایش جریان روی ایرفویل نداشته و مقادیر ضریب نیروی برا و ضریب نیروی پسا در این حالت برابر حالتی است که هیچ عملگر پلاسمایی روی سطح ایرفویل قرار ندارد.



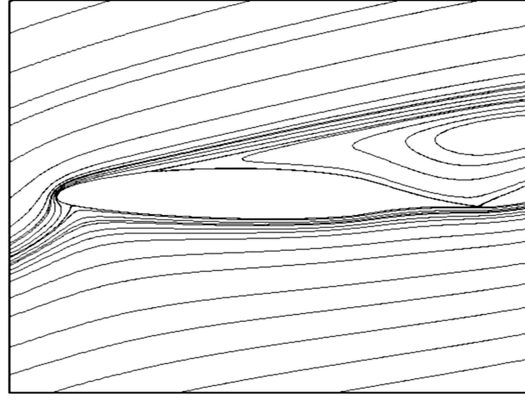
الف) عدم حضور عملگر پلاسمایی؛



الف) عدم حضور عملگر پلاسمایی؛



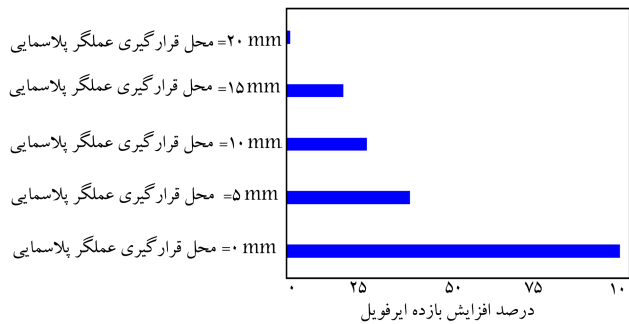
ب) حضور عملگر پلاسمایی.



ب) حضور عملگر پلاسمایی در نوک ایرفویل.

شکل ۱۲. کانتور ضریب فشار در اطراف ایرفویل در زاویه‌ی حمله‌ی ۱۸ درجه.

شکل ۱۱. خطوط جریان عبوری از روی ایرفویل در زاویه‌ی حمله‌ی ۱۸ درجه.



شکل ۱۳. نمودار درصد افزایش ضریب کارایی ایرفویل در شرایط حضور عملگر پلاسمایی نسبت به عدم حضور آن بر روی سطح فوقانی ایرفویل در زاویه‌ی حمله‌ی ۱۸ درجه.

کانتورهای فوق به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسمایی و تزریق ممتوم به لایه‌ی مرزی سطح فوقانی ایرفویل سبب کاهش ضریب فشار روی آن می‌شود. از آنجا که اختلاف میان ضریب فشار روی سطح بالایی و پایینی ایرفویل تعیین‌کننده‌ی میزان کارایی ایرفویل است، پیداست که حضور عملگر سبب افزایش کارایی ایرفویل می‌شود. به منظور بررسی بیشتر، مقایسه‌ی میان نسبت ضریب نیروی برا به ضریب نیروی پسا در حالت‌های مختلف قرارگیری عملگر پلاسمایی روی ایرفویل انجام گرفته است (شکل ۱۳).

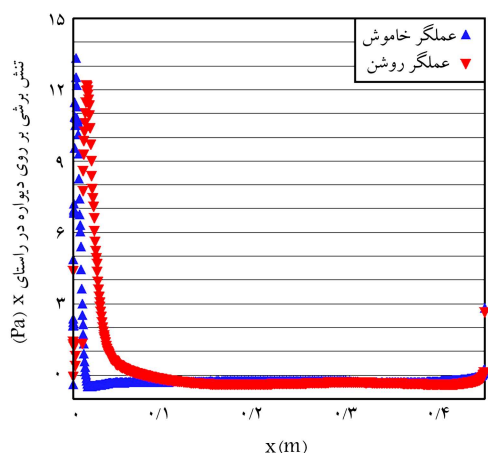
چنان که پیش‌تر نیز گفته شد، نمودار ۱۳ نشان می‌دهد که حضور عملگر پلاسمایی در نوک ایرفویل بیشترین تأثیر را در افزایش کارایی ایرفویل خواهد داشت. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که نوک ایرفویل نقطه‌ی بهینه برای قراردادن عملگر پلاسمایی روی سطح ایرفویل برای تزریق انرژی به داخل سیال و بیشینه‌سازی کارایی ایرفویل (نسبت ضریب نیروی برا به ضریب نیروی پسا) است. در این بررسی حضور عملگر پلاسمایی در نوک ایرفویل، میزان کارایی ایرفویل را نسبت به حالتی که عملگر پلاسمایی بر روی سطح ایرفویل قرار ندارد تقریباً ۲ برابر کرده که میزان قابل توجهی است. این در حالی است که میزان افزایش ضریب کارایی ایرفویل در حالتی که عملگر پلاسمایی در نقطه‌ی ۲۰ mm از نوک ایرفویل قرار گرفته است کم‌ترین مقدار را داشته و فقط حدود ۲٪ است.

از روی ایرفویل حاصل شده، در شکل ۱۴ ترسیم شده است. پروفیل‌های سرعت جریان در مقاطع مختلف ۱۰، ۱۶، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متری ترسیم شده است.

میانگین سرعت جریان عبوری از روی ایرفویل در مقاطع مختلف، در حالتی که عملگر پلاسمایی روی سطح ایرفویل قرار ندارد، به طور قابل توجهی از این مقدار در حضور عملگر پلاسمایی در نوک ایرفویل و در مقاطع مشابه کم‌تر است (شکل ۱۴).

شکل ۱۴ به خوبی نشان می‌دهد که نقطه‌ی شروع جدایش جریان روی ایرفویل

پروفیل سرعت جریان عبوری از روی سطح فوقانی ایرفویل در مقاطع مختلف، در دو حالت عدم حضور عملگر پلاسمایی روی ایرفویل و حضور عملگر پلاسمایی درست در نوک ایرفویل که از شبیه‌سازی عددی جریان عبوری



شکل ۱۵. نمودار تنش برشی (در راستای طول کورد ایرفویل) روی سطح فوقانی ایرفویل در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی.

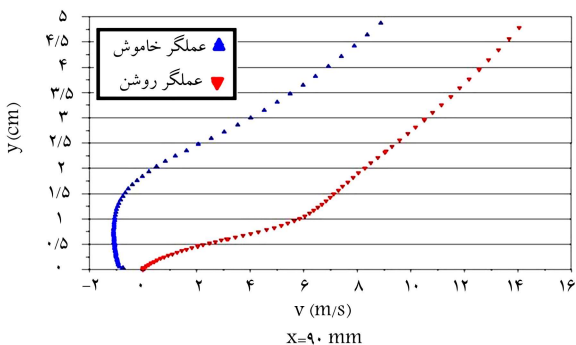
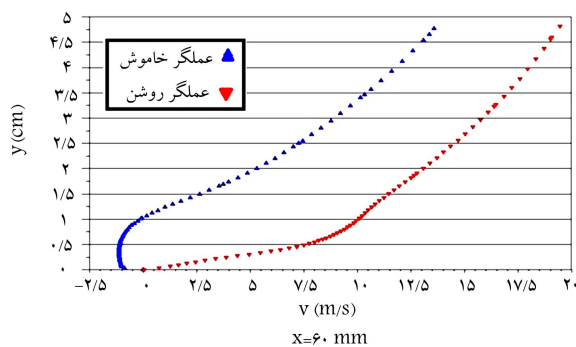
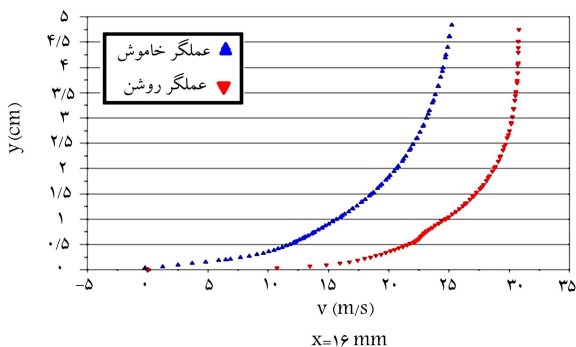
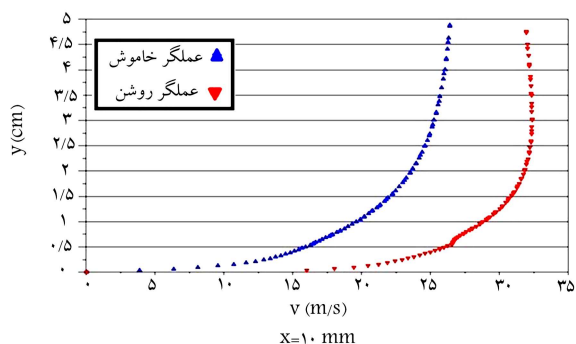
عملگر پلاسمایی اتفاق می افتد را می توان به کمک نمودار تنش برشی روی سطح ایرفویل نیز نمایش داد. شکل ۱۵ نمودار تنش برشی (در راستای طول کورد ایرفویل) بر روی سطح ایرفویل را در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی نشان می دهد. چنان که مشاهده می شود در حالت عدم حضور عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل، مقدار تنش برشی روی سطح ابتدا مقداری مثبت دارد و سپس در فاصله ۱۶mm از نوک ایرفویل مقدار صفر به خود گرفته و پس از آن مقادیر منفی را اختیار می کند. منفی شدن تنش برشی بر روی سطح به معنی وقوع جریان برگشتی روی سطح ایرفویل است که منجر به منفی شدن گرادیان سرعت در راستای جریان و در نتیجه تنش برشی می شود. اما پس از استفاده از عملگر پلاسمایی نقطه صفر شدن تنش برشی روی دیواره به مقطع ۹۰mm منتقل شده است که نشانگر تأخیر در وقوع پدیده جدایش و به تبع آن افزایش کارایی ایرفویل است.

به طور کلی می توان چنین نتیجه گیری کرد که حضور عملگر پلاسمایی و اعمال نیروی حجمی حاصل از تولید پلاسمای، سبب تریق مستقیم به ناحیه اطراف عملگر و در حقیقت سطح فوقانی ایرفویل می شود. همین امر باعث افزایش سرعت در لایه مرزی جریان شده و چنان که پیش تر گفته شد سبب به تأخیر افتادن جدایش بر روی سطح ایرفویل می شود.

۵. نتیجه گیری

در این بررسی، پس از اطمینان از صحت نتایج عددی و تجربی حاصل از عملگر پلاسمایی بر روی یک ایرفویل در حالت استال مقایسه میان نتایج عددی و تجربی شبیه سازی جریان اطراف ایرفویل در دو حالت حضور و عدم حضور عملگر پلاسمایی انجام گرفت و چنان که انتظار می رفت، نتایج نشان از افزایش قابل توجه کارایی ایرفویل در حضور عملگر پلاسمایی داشت. در مرحله ی بعد، میزان تأثیر مکان قرارگیری عملگر پلاسمایی بر میزان کاهش درهمی جریان و به تأخیر انداختن پدیده جدایش به صورت عددی بررسی شده است.

نتایج به وضوح نشان داد که حضور عملگر پلاسمایی دقیقاً در نوک ایرفویل سبب بیشترین افزایش در کارایی ایرفویل و به تأخیر انداختن پدیده جدایش می شود. این افزایش کارایی ایرفویل به حدی است که در این حالت میزان افزایش نسبت ضریب



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

در حالتی که عملگر پلاسمایی روی ایرفویل تعبیه نشده است تقریباً در $x = 16\text{mm}$ رخ می دهد؛ در حالی که پس از استفاده از عملگر پلاسمایی نقطه جدایش جریان به مکان $x = 90\text{mm}$ منتقل شده است که نشانگر جابه جایی نقطه جدایش در حدود 74mm بوده و تأثیر بسیار چشم گیر حضور عملگر پلاسمایی را بر روی جریان نشان می دهد. مقدار جابه جایی در شروع نقطه جدایش بر روی سطح ایرفویل که با استفاده از

فهرست علائم

- Φ : پتانسیل کل
 ϕ : پتانسیل حاصل از میدان الکتریکی خارجی
 φ : پتانسیل حاصل از چگالی بار کل
 λ_d : طول دبی
 n_i : چگالی یون
 n_e : چگالی الکترون
 n_o : چگالی پلاسمای زمینه
 e : بار مقدماتی
 k : ثابت بولتزمن
 T_i : دمای یون
 T_e : دمای الکترون
 ω : فرکانس
 ϕ^{\max} : دامنه موج

نیروی برا به ضریب نیروی پسا نسبت به حالتی که عملگر پلاسمایی بر روی ایرفویل قرار ندارد در حدود 10% است.

علاوه بر این نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که استفاده از این عملگر در نوک ایرفویل می‌تواند نقطه‌ی شروع جدایش روی سطح ایرفویل را به میزان قابل توجهی جابه‌جا کند؛ این میزان جابه‌جایی در زاویه‌ی حمله‌ی 18° درجه و سرعت جریان 25m/s از $x = 16\text{mm}$ به $x = 90\text{mm}$ است که به معنی تأخیر در جدایش جریان به میزان 74mm است. با توجه به این نتایج می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مکان بهینه برای بیشترین تأثیر در افزایش بازده ایرفویل، نوک ایرفویل است.

تقدیر و تشکر

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.

پانویس‌ها

1. AC surface dielectric barrier discharge plasma actuator
2. permittivity
3. half Gaussian

منابع (References)

1. Roth, J.R., Sherman, D.M., Wilkinson, S.P. "Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma", AIAA Meeting, Reno, USA, paper #98-0328 (January 1998).
2. Roth, J.R., "Electrohydrodynamically induced airflow in a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma", 25th IEEE Int. Conf. Plasma Science, Raleigh, USA (1998).
3. McLaughlin, T.E., Munzka, M.D., Vaeth, J.P., Dauwalter, T.E., Goode, J.R. and Siegel, S.G. "Plasma-based actuators for cylinder wake vortex control", AIAA Meeting, Portland, USA (2004).
4. Post, L. and Corke, T.C. "Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators", *AIAA Journal*, **42**, pp. 2177-2184 (2004).
5. Corke, T.C., He, C. and Patel, M.P. "Plasma flaps and slats: An application of weakly-ionized plasma actuators", AIAA Meeting, Portland, USA, paper #2004-2127 (June 2004).
6. Forte, M., Jolibois, J., Moreau, F., Touchard, G. and Gazalens, M. "Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity- application to airflow control", *Experiments in Fluids*, **43**(6), pp. 917-928 (2007).
7. Corke, T.C., Post, M.L., Orlov, D.M. "Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: Physics, modeling and applications", *Review Article, Experiments in Fluids*, **46**(1), pp. 1-26 (2008).
8. Jayaraman, B., Cho, Y. and Shyy, W. "Modeling of dielectric barrier discharge plasma actuator", *Journal of Applied physics*, **103**(5), pp. (2008).
9. Suzen, Y.B., Huang, P.G., Jacob, J.D. and Ashpis, D.E. "Numerical simulation of plasma based flow control applications", 35th Fluid Dynamics Conference and Exhibit (2005).
10. Jayaraman, B. and Shyy, W. "Modeling of dielectric barrier discharge-induced fluid dynamics and heat transfer", *Progress in Aerospace Sciences*, **44**, pp. 130-191 (2008).
11. Peers, E., Huang, X., Luo, X. "A numerical model of plasma-actuator effects in flow-induced noise control", *IEEE Trans. Plasma Sci*, **37**, pp. 2250-2256 (2009).
12. Li, Y., Zhang, X. and Huang, X. "The use of plasma actuators for bluff body broadband noise control", *Experiments in Fluids*, **49**(2), pp.367-377 (2010).
13. Thomas, F., Kozlov, A. and Corke, T. "Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction", *AIAA Journal*, **46**(8), pp. 1921-1931 (2008).
14. Shyy, W., Jayaraman, B. and Andersson, A. "Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics", *Journal of Applied Physics*, **92**(11), pp. 6434-6443 (2002).
15. Haung, J., Corke, T.C. and Thomas, F.O. "Plasma actuator for separation control of low-pressure turbin blade", *AIAA Journal*, **44**, pp. 51-57 (2006).

16. Durbin, P.A., *Near-wall Turbulence Closure Modeling without Damping Functions*, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Chap. 3, pp. 1-13 (1991).
17. Roth, J.R., Sherman, D.M. and Wilkinson, S.R. "Electrohydrodynamic flow control with a glow-discharge surface plasma", *AIAA Journal*, **38**(7), pp. 1166-1172 (2000).
18. Enloe, C.L., Mclaughlin, T.E., VanDyken, R.D., Kachner, K.D., Jumper, E.J., Corke, T.C., Post, M. and Haddad, O. "Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: Geometric effects", *AIAA Journal*, **42**(3), pp. 595-604 (2004).
19. LeBeau, R.P., Reasor, D.A., Suzen, Y.B., Jacob, J.D. and Huang, P.G. "Unstructured grid simulations of flow separation control using plasma actuator", 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Miami, FL (2007).
20. Enloe, C.L., Mclaughlin, T.E., Font, G.I. and Baughn, J.W. "Parameterization of temporal structure in a single dielectric barrier aerodynamic plasma actuator", *AIAA J.* **44**(6) pp.1127-1136 (2006).
21. Enloe, C.L., Mclaughlin, T.E., VanDyken, R.D. and Fischer, J.C. "Plasma structure in the aerodynamic plasma actuator", 42nd AIAA Aerospace sciences Meeting and Exhibit, Reno ,Nevada (2004).
22. Taleghani, A.Sh. "Experimental-numerical analysis of flow control over a wing with plasma actuator", Ph.D. Thesis, K.N.Toosi University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering (2012).
23. Taleghani, A.Sh., Shadaram, A. and Mirzaei, M. "Effects of duty cycles of the plasma actuators on improvement of pressure distribution above a NLF0414 airfoil", *IEEE Transactions on Plasma Science*, **40**(5), pp.1434-1440 (2012).