



بررسی عددی تاثیر عملگرهای پلاسمای سد تخلیه دی‌الکتریک (DBD) بر کنترل جدایش جریان فراصوت

امین نظریان شهربابکی^۱، مهرداد بزاززاده^{۲*}، و روح ا... خوشخو^۳

^۱ دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

^۲ دانشیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

^۳ استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۷/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۵

چکیده

هدف از این پژوهش، کنترل جریان فراصوت عبوری از یک سطح شیب‌دار تراکمی در عدد ماخ ۱/۵ با استفاده از عملگر پلاسمای سد تخلیه دی‌الکتریک (DBD) است. به‌منظور شبیه‌سازی عددی، از معادلات ناویر استوکس دو و سه‌بعدی به همراه مدل آشفتگی $k\omega$ SST و روش جیمسون استفاده شده است. عملگر پلاسمایی به‌صورت پایا و با بهره‌گیری از رویکرد پدیده‌شناسی شایبی شبیه‌سازی و به‌صورت جمله چشمه به معادلات ممنتیم اعمال شده است. نتایج عددی نشان دادند که حضور دو ردیف عملگر پلاسمایی با ولتاژ ۷۵ kV و فرکانس ۲ kHz در محل شروع جدایش جریان، موجب کاهش ناحیه جدایش به اندازه ۱۰ mm، جابجایی موقعیت موج ضربه‌ای و افزایش زاویه آن به مقدار ۲ درجه شده است. بررسی‌های پارامتریک نشان دادند که حالت بهینه تاثیرگذاری عملگر بر کنترل جدایش زمانی است که دقیقاً در محل شروع جدایش قرار گیرد؛ همچنین، افزایش فرکانس و ولتاژ میدان الکتریکی، موجب کاهش ناحیه جدایش و جابجایی موج ضربه‌ای می‌شود. در نهایت، افزایش تعداد عملگرها به سه ردیف، افزایش فرکانس تا ۱۰ کیلوهرتز و ولتاژ تا ۷۵ کیلوولت، به‌طور کامل موجب حذف ناحیه جریان گردابی ناشی از جدایش جریان گردید.

کلمات کلیدی: عملگر پلاسمای DBD؛ جریان فراصوت؛ شبیه‌سازی عددی؛ جدایش جریان.

Numerical Study of Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuators on Separation Control of Supersonic Flow

A. Nazarian Shahrabaki¹, M. Bazazzade^{2,*}, R. Khoshkhou³

¹ PhD Candidate, Faculty of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

² Assoc. Prof., Faculty of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

³ Assis. Prof., Faculty of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

Abstract

The aim of present study is to control the supersonic flow ($M=1.5$) over a compression ramp using Dielectric Barrier Discharge (DBD) plasma actuators. For numerical simulation, 2D and 3D Navier-Stokes equations along with the $k\omega$ SST turbulence model and Jameson's method are used. DBD Actuator is simulated in steady mode using Shyy phenomenological model and then applied to the momentum equations as a source term. The numerical results with the presence of two rows of DBD in voltage of 75 kV and frequency of 2 kHz discharging at starting point of separation reduced the separation region by 10 mm, moved shock location and increased its angle by 2°. Parametric study of DBDs are illustrated that the most efficient location of actuator is related to time when actuator is exactly located at the start point of separation. Also, increasing frequency and voltage of DBD reduced the separation and formation of vortices as well as the displacement of shock wave. Finally, increasing the number of DBD to three rows, with the frequency and voltage up to 10 kHz and 75 kV respectively, completely eliminate the vortices of separation region.

Keywords: DBD Plasma Actuator; Supersonic Flow; Numerical Simulation; Flow Separation.

۱- مقدمه

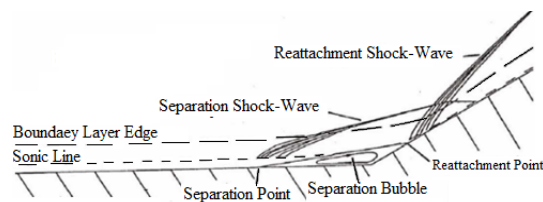
برهمکنش موج ضربه‌ای-لایه مرزی^۱ یکی از پدیده‌های دینامیک سیالات است که تحلیل آن در بسیاری از کاربردهای فراصوت و ماوراءصوت به خصوص دهانه‌های ورودی انواع پرنده‌های فراصوت، موشک‌ها، راکت‌ها، ایرفویل و همچنین سایر قسمت‌های هواپیماها اهمیت ویژه‌ای دارد. برهمکنش موج ضربه‌ای با لایه مرزی، موجب ایجاد گردان فشاری معکوس در ناحیه برهمکنش می‌شود که از پیامدهای آن می‌توان به جدایش جریان^۲ و افزایش ضخامت لایه مرزی اشاره داشت. شماتیکی از برهمکنش موج ضربه‌ای-لایه مرزی ناشی از جریان فراصوت عبوری از یک سطح شیب‌دار تراکمی در شکل ۱ ارائه شده است [۱].

در شکل ۱ مشاهده می‌شود که عبور جریان فراصوت از یک سطح شیب‌دار موجب ایجاد جدایش جریان و در نتیجه تشکیل حباب‌های جدایش^۳ کوچک در ناحیه برهمکنش موج ضربه‌ای-لایه مرزی شده است. ناحیه جدایش تشکیل شده در مجاورت سطح شیب‌دار موجب افزایش ضخامت لایه مرزی و همچنین جابجایی موج ضربه‌ای مایل می‌شود. در دهانه‌های ورودی فراصوت، برهمکنش موج ضربه‌ای-لایه مرزی می‌تواند منجر به رشد ناحیه جدایش گردد که پیامدهایی مانند کاهش سطح مقطع موثر عبور هوا و جریان جرمی عبوری از دهانه، افت قابل توجه در فشار کل، افزایش ضخامت لایه مرزی، افزایش نیروی پسا، عدم یکنواختی و نوسانات در جریان ورودی و در نهایت عدم راه‌اندازی دهانه گردد؛ بنابراین کنترل برهمکنش موج ضربه‌ای-لایه مرزی با رویکرد کاهش طول ناحیه جدایش موضوع ویژه‌ای است که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در زمینه علم آیرودینامیک قرار گرفته است.

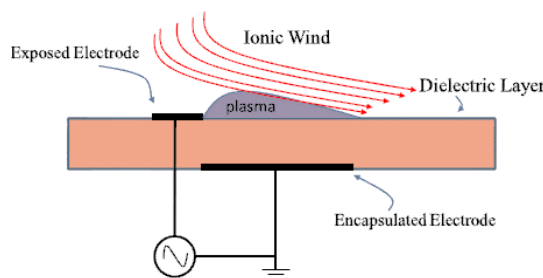
طرح‌های مختلفی جهت دسته‌بندی روش‌های کنترل جریان وجود دارد. یک نمونه از این طرح‌ها، دسته‌بندی براساس نحوه انتقال انرژی به جریان سیال است. روش‌های کنترل جریان براساس نحوه انتقال انرژی به جریان، به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. استفاده از مولدهای

گردابه مکانیکی (در قالب میکرو سطح شیب‌دار^۴، میکرو پره^۵ و ... [۱] و تعبیه شکاف/شیار [۲]، به‌عنوان ابزارهای کنترل غیرفعال در نظر گرفته می‌شوند؛ همچنین روش‌های دمش و مکش لایه‌مرزی [۳]، سیستم هندسه متغیر [۴] و عملگرهای پلاسما [۵] به‌عنوان روش‌های کنترل فعال تلقی می‌گردند. هریک از ابزارها و روش‌های مطرح شده به نوبه خود دارای مزایا و معایبی می‌باشند. در این میان، عملگرهای پلاسمایی به‌دلیل ساختار ساده، پاسخگویی سریع، توان مصرفی کم، کنترل‌پذیری بالا و نداشتن بخش‌های متحرک بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

یکی از پرکاربردترین نوع از عملگرهای پلاسمایی، عملگرهای سد تخلیه دی الکتریک^۶ می‌باشند که در زمره عملگرهای الکتروهایدرودینامیک و غیرگرمایی قرار دارند. شماتیک عملگر DBD با الکترودهای غیرمستقران در شکل ۲ ارائه شده است [۶]. این عملگرها از دو الکتروده تشکیل شده‌اند که توسط ماده دی الکتریک از یکدیگر جدا می‌شوند. اعمال جریان متناوب بین الکترودها، موجب یونیزه



شکل ۱- شماتیک برهمکنش موج ضربه‌ای-لایه مرزی در جریان فراصوت عبوری از یک سطح شیب‌دار تراکمی [۱]



شکل ۲- شماتیک یک عملگر DBD [۶]

⁴ Micro Ramp

⁵ Micro Vane

⁶ Dielectric Barrier Discharge (DBD)

¹ Shock Wave Boundary Layer Interaction

² Flow Separation

³ Separation Bubble

نوآورانه روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ استفاده نمودند و نشان دادند که استفاده از عملگرهای DBD و جت القایی تولید شده منجر به کنترل جدایش شده است. ایم و کپلی [۱۴] تلاش‌هایی در راستای بهبود لایه مرزی آشفته در یک دهانه ورودی و در عدد ماخ ۴/۷ توسط عملگر DBD انجام داده‌اند که حاصل کار آن‌ها منجر به کاهش ضخامت لایه مرزی آشفته گردید.

از آنجایی که بیشتر پژوهش‌های متمرکز بر عملگرهای DBD، به کاربردهای کنترل جریان در سرعت‌های زیرصوت پرداخته است، تاکنون پژوهشی متمرکز بر کاربرد عملگرهای DBD در کنترل جریان فراصوت با رویکرد کنترل طول ناحیه جدایش جریان انجام نشده است. از نوآوری‌های این پژوهش، می‌توان به بررسی عددی تاثیر عملگرهای DBD بر نحوه توزیع تنش برشی جریان عبوری از سطح شیب‌دار و بررسی چگونگی تاثیرگذاری تغییر پارامترهای کلیدی عملگر DBD (مانند ولتاژ و جریان میدان الکتریکی) بر جابجایی نقطه شروع جدایش جریان و محل شکل‌گیری موج ضربه‌ای مایل دانست. در این راستا، نحوه تاثیرگذاری عملگر DBD بر جریان فراصوت عبوری از یک سطح شیب‌دار با عدد ماخ ۱/۵، با هدف کنترل ناحیه جدایش جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج شبیه‌سازی برای جریان فراصوت عبوری از سطح شیب‌دار با عدد ماخ ۱/۵، با حضور دو ردیف عملگر پلاسمایی با ولتاژ ۷۵ kV و فرکانس ۲ kHz، نشان دادند که عملگرهای استفاده شده در کاهش طول ناحیه جدایش کاملاً موثر بوده‌اند.

۲- روش حل و شبیه‌سازی مدل عددی

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

به‌منظور شبیه‌سازی عددی جریان پایه، از معادلات ناویر-استوکس به‌صورت دو و سه‌بعدی تراکم‌پذیر همراه با مدل آشفتگی $k\omega$ SST استفاده شده است. شکل بی‌بعد شده معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی به‌صورت روابط زیر نوشته می‌شود. جمله‌های اضافه شده به سمت راست معادلات ممنتوم و انرژی، اثر تخلیه الکتریکی پلازما روی جریان سیال است.

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \nabla^* \cdot (\rho^* \vec{U}^*) = 0 \quad (1)$$

شدن هوا و در نتیجه تولید یک نیروی جسمی^۱ پیرامون ناحیه تشکیل پلازما می‌شود که به‌عنوان عامل کنترل جریان شناخته می‌شود.

پژوهش‌های مختلفی روی عملگرهای DBD با رویکرد کنترل جریان انجام شده است. در بین پژوهش‌های داخلی، قرائیان و همکاران [۷] با استفاده از عملگرهای DBD به کنترل عددی جدایش جریان آشفته هنگام افتادن از روی پله پسر و پرداختند. نتایج آن‌ها با استفاده از مدل شایبی^۲ حاکی از کاهش طول ناحیه جدایش با فعال کردن عملگر پلاسمایی بود. به‌طوری‌که در مد تحریک دائمی و در یک فرکانس تحریک مشخص با افزایش مقدار ولتاژ تغذیه الکترودها، طول ناحیه جدایش کاهش یافت؛ همچنین عبدی‌زاده و قاسملو [۸]، به بررسی عددی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ تحت نوسان انتقالی و برخی عوامل مؤثر بر آن با و بدون حضور عملگر پلاسمای DBD پرداختند. نتایج آن‌ها نشان دادند، در حالتی که عملگر پلاسمایی روشن باشد، ضریب برآ و نیروی پیشران افزایش یافته و بازده آیرودینامیکی ایرفویل بهبود پیدا می‌یابد. در پژوهشی دیگر، امیدی و مظاهری [۹] با استفاده از یک مدل الکتروستاتیک ارتقاء یافته، اثر عملگر پلاسمای DBD بر جریان روی یک ایرفویل را مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج آن‌ها، با استفاده از عملگر پلاسمایی، زاویه حمله جدایش از ۱۵ به ۲۱ درجه به تأخیر افتاد و همچنین بیش از ۳۱٪ بهبود در بیشینه ضریب برآ و بیش از ۱۵٪ در بیشینه نسبت ضریب برآ به پسای ایرفویل ایجاد گردید.

پرو و همکاران [۱۰] با استفاده از عملگرهای DBD به کنترل عددی جدایش جریان درون یک دهانه ورودی فراصوت با هدف بهبود بازبایی فشار دهانه پرداخته‌اند. پاتل و همکاران [۱۱]، به بررسی کاربرد DBDها در کنترل جدایش جریان ناشی از برهمکنش موج ضربه‌ای-لایه مرزی در دهانه ورودی فراصوت پرداختند. گونسالس و کین [۱۲] با بهره‌گیری از روش عددی-ترکیبی LES-RANS، جریان عبوری از روی یک پله را به‌صورت عددی مدل کردند و با استفاده از عملگرهای DBD موفق به کنترل جدایش جریان شدند. عرفانی و کنتیس [۱۳] از عملگرهای DBD با ساختاری

^۱ Body Force

^۲ Shyy Model

$$\begin{aligned}
 F_I &= \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (\rho e + p)u \end{bmatrix}, G_I = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho e + p)v \end{bmatrix}, \\
 H_I &= \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ (\rho e + p)w \end{bmatrix}, \\
 F_V &= \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \\ (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + q_x \end{bmatrix}, \\
 G_V &= \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zy} \\ (u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + q_y \end{bmatrix}, \\
 H_V &= \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \\ (u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz}) + q_z \end{bmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

که S به عنوان بردار چشمه، شامل جمله‌های مربوط به نیرو و انرژی تولید شده در DBD است که با توجه به نوع شبیه‌سازی پلاسمای براساس روش پدیده شناسی شایبی محاسبه و در قالب جمله چشمه به معادلات رابطه ۷ می‌شود. در این رابطه، جمله‌های $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \tau_{xx}, \tau_{zy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ و τ_{zz}, τ_{yz} تانسور تنش برشی و جمله‌های q_x, q_y و q_z شار هدایت گرمایی می‌باشند.

جهت شبیه‌سازی آشفتگی جریان، از مدل انتقال تنش برشی $k\omega$ SST^۱ به همراه تابع دیواره استفاده شده است. این مدل آشفتگی به منظور آمیختن فرمول‌بندی دقیق و قدرتمند مدل $k\omega$ در نواحی نزدیک دیواره با مدل $k\varepsilon$ مستقل از جریان آزاد در نواحی دور از دیواره ارائه شده است. جزئیات بیشتر در رابطه با این مدل در مرجع ۱۵ ارائه شده است.

$$\frac{\partial \rho^* \bar{U}^*}{\partial t^*} + \nabla^* \cdot (\rho^* \bar{U}^* \bar{U}^* + p^* \bar{I}) - \nabla^* \cdot \bar{\tau}^* = D_c q^* \bar{E}^* \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho^* e^*}{\partial t^*} + \nabla^* \cdot [(\rho^* e^* + p^*) \bar{U}^* - (\bar{U}^* \cdot \bar{\tau}^*)] \\
 - Q_{ht}^* = \beta D_c q^* \bar{U}^* \cdot \bar{E}^* \quad (3)
 \end{aligned}$$

در روابط بالا، علامت * نشان‌دهنده مقادیر بی‌بعد شده و $\bar{U}^* = \{u^*, v^*, w^*\}$ بردار سرعت است؛ همچنین ρ^* چگالی، p^* فشار، t^* زمان، $\bar{\tau}^*$ تانسور تنش برشی، Q_{ht}^* جمله هدایت گرمایی، e^* انرژی کل، D_c جمله استهلاک مصنوعی بار الکتریکی، q^* چگالی بار الکتریکی و $\bar{E}^* = \{E_x^*, E_y^*, E_z^*\}$ بردار میدان الکتریکی است؛ همچنین β نشان‌دهنده اعمال نیروی ایجاد شده در اثر میدان الکتریکی (صفر یا یک) است. بی‌بعدسازی از طریق مجموعه روابط ۴ محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}
 \rho^* &= \frac{\rho}{\rho_{ref}}, U^* = \frac{U}{\frac{a_{ref}}{\sqrt{\gamma}}} = \frac{U}{\sqrt{\frac{p_{ref}}{\rho_{ref}}}} \\
 p^* &= \frac{p}{p_{ref}}, e^* = \frac{e}{p_{ref}}, \mu^* = \frac{\mu}{\mu_{ref}} \frac{M\sqrt{\gamma}}{Re} \quad (4)
 \end{aligned}$$

که ref دلالت بر مقدار مرجع دارد و a_{ref} سرعت صوت جریان آزاد است. پارامتر D_c ، نشان‌دهنده اندازه نیروی الکتریکی به اینرسی است که از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$D_c = \frac{\rho_{c,ref} e_c E_{ref} L_{ref}}{P_{ref}} \quad (5)$$

ρ_c چگالی عددی بار الکتریکی و e_c بار الکتریکی است. لازم به ذکر است، در ادامه بالانویس * حذف شده و همه مقادیر به صورت بی‌بعد فرض شده است؛ بنابراین معادلات حاکم را می‌توان به صورت برداری ارائه شده در رابطه ۶ نوشت.

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial F_I}{\partial x} + \frac{\partial G_I}{\partial y} + \frac{\partial H_I}{\partial z} = \frac{\partial F_V}{\partial x} + \frac{\partial G_V}{\partial y} + \frac{\partial H_V}{\partial z} + S \quad (6)$$

که بردار جواب است $X = \{\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e\}$ و جمله‌های F_I, G_I, H_I و F_V, G_V, H_V مربوط به مقادیر غیرلزج و جمله‌های F_V, G_V, H_V مربوط به اثرات لزجت می‌باشند که به صورت مجموعه روابط ۷ نوشته می‌شوند.

^۱ Shear Stress Transport (SST)

۲-۳- روش حل عددی

در این پژوهش، از روش چگالی مینا^۳، فرمول بندی صریح^۴ و روش جیمسون^۵ و کدنویسی با استفاده از زبان برنامه نویسی فورترن^۶ استفاده شده است. در کدنویسی شبیه سازی عددی از روش مبتنی بر حجم استفاده شده است و الگوریتم گسسته سازی مکانی مورد استفاده از نوع مرکزی بوده و ساختار اطلاعاتی مورد استفاده برای شبکه از نوع مبتنی بر ضلع است. همچنین از حجم کنترل نوع مرکز سلولی استفاده شده است. در گسسته سازی زمانی معادلات جریان از روش صریح استفاده شده است.

در شبیه سازی عددی و در روش های مبتنی بر اختلاف مرکزی به دلیل عدم ارتباط بین نقاط زوج و فرد و عدم وجود جمله های مستهلک کننده ذاتی، اغتشاشات و نوسانات ایجاد شده در میدان جریان، میرا نشده و باعث اختلال در همگرایی الگوریتم حل و در مواردی که گرادینان متغیرهای جریان بالا باشد، مثل هنگامی که موج ضربه ای در میدان وجود دارد، باعث واگرایی آن می شود. از نظر تئوری، در یک جریان لزج، لزجت طبیعی جریان برای رفع نوسانات ناشی از گسسته سازی مرکزی می بایست کافی باشد، اما برای رسیدن به این شرایط باید از یک شبکه محاسباتی بسیار ریز استفاده نمود. در این پژوهش، به منظور از بین بردن این نوسانات در روش های اختلاف مرکزی، از جمله استهلاک مصنوعی استفاده شده است.

استهلاک مصنوعی معرفی شده توسط جیمسون و ماوریلیس [۱۷] برای شبکه های با سازمان تدوین شده بود، شامل ترکیبی از مشتقات چهارم و دوم متغیرهای بقایی جریان به همراه دو پارامتر تطبیقی تابع کمیت های جریان و دو ثابت قابل تنظیم است. بخش مرتبه دوم جهت حذف نوسانات اطراف ناپیوستگی ها و بخش مرتبه چهارم جهت حذف نوسانات داخل میدان به کار گرفته شده است. جمله مرتبه دوم در ضریبی متناسب با گرادینان فشار ضرب شده (پارامتر تطبیقی) و بنابراین مقدار آن در اطراف ناپیوستگی ها قابل ملاحظه شده و در سایر نواحی بسیار کم است؛ همچنین

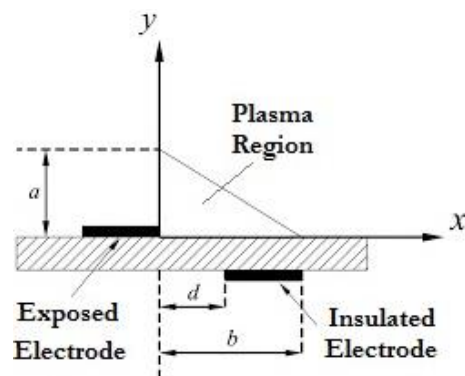
۲-۲- شبیه سازی عملگر پلاسمایی

یکی از مدل های پر کاربرد برای شبیه سازی DBD ها، مدل پدیده شناسی شای^۱ بوده که با هدف تخمین نیروی جسمی تولید شده در پلازما توسعه یافته است. شای [۱۶]، روشی را بر اساس نتایج تجربی برای محاسبه نیروی متوسط زمانی (شبه پایدار) برای همبستگی^۲ نیروی پلازما با معادلات سیال خنثی استفاده کرد که طبق آن، تغییرات میدان الکتریکی در فضا را می توان با تقریب مناسب، بدون در نظر گرفتن جزئیات، مطابق با ناحیه مثلثی شکل در شکل ۳ خطی سازی کرد.

بردار جمله چشمه به عنوان خروجی اثرات پلازما، به صورت رابطه ۸ محاسبه می شود.

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ D_c \rho_c E_x \\ D_c \rho_c E_y \\ D_c \rho_c E_z \\ \beta D_c (u E_x + v E_y + w E_z) \end{bmatrix} \quad (8)$$

که E_x ، E_y و E_z اجزای بردار میدان الکتریکی در دستگاه مختصات کارتزین می باشند. β اثر انرژی تولید شده و کار انجام شده توسط عملگر پلازما را نشان می دهد که می تواند دارای مقدار صفر یا یک باشد. به دلیل این که در واقعیت، میزان کار انجام شده توسط عملگر پلازما ناچیز است، به همین علت این پارامتر صفر در نظر گرفته می شود. در آخر، D_c پارامتر بدون بعد نشان دهنده میزان توان عملگر پلازما است.



شکل ۳- شماتیک ناحیه مثلثی شکل در عملگر DBD

³ Density Based

⁴ Explicit

⁵ Jameson

⁶ Fortran

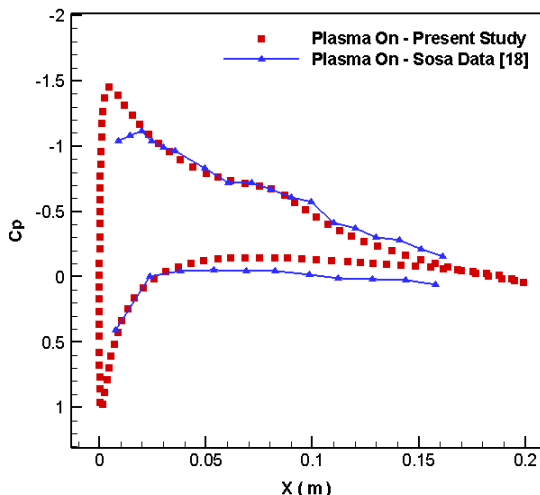
¹ Shyy Phenomenological Model

² Couple

شده است. نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل پدیده‌شناسی مورد استفاده می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، در ابتدای نمودار، مقداری اختلاف وجود دارد که در محدوده محل قرارگیری عملگر پلازما است. علت اصلی اختلاف، به علت استفاده از روش پدیده‌شناسی از عملگر پلازما است و در این روش معادلات پلازما به طور کامل حل نشده و از یک رابطه نیرو به عنوان نیروی حاصل از عملگر پلازما در معادله ممنتم استفاده می‌شود.

۳-۲- اعتبارسنجی جریان پایه دو و سه بعدی

جهت اعتبارسنجی جریان بدون کنترل عبوری از سطح شیب‌دار در حالت‌های دو و سه بعدی، از اطلاعات ارائه شده در مرجع ۱۱ استفاده شده است. جریان آزاد با عدد ماخ ۱/۵ از روی یک سطح صاف به طول ۱/۴ متر عبور و به یک سطح شیب‌دار با زاویه ۱۲° می‌رسد. شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی دوبعدی یک شبکه با سازمان شامل، ۱۴۳۰۰۰ سلول، ۲۸۶۸۷۰ وجه و ۱۴۳۸۷۱ گره است. در شکل ۵، شبکه مورد استفاده به همراه نمای نزدیک در محل تاثیرگذاری عملگر نشان داده شده است؛ همچنین شبکه سه بعدی که از توسعه شبکه دوبعدی در راستای محور Z به مقدار ۲۵ cm ایجاد شده، در شکل ۶ ارائه شده است. شبکه سه بعدی شامل، ۱۴۳۰۰۰ سلول، ۴۴۴۱۷۰۰ وجه و ۱۵۸۲۵۸۱ گره است. به منظور استفاده از مدل آشفتگی SST k ω و تابع دیوار،



شکل ۴- مقایسه توزیع فشار جریان عبوری از ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ با حضور عملگر پلاسمایی و نتایج تست تجربی [۱۸]

جمله مرتبه چهارم به گونه‌ای در نظر گرفته شده که در اطراف ناپیوستگی‌ها مقدار این جمله صفر شده و به این ترتیب از نوسانات ناخواسته جلوگیری می‌شود. در شبکه‌های با سازمان، معمولاً از ترکیب یک جمله مشتق مرتبه دوم متغیرهای بقایی برای حذف نوسانات اطراف موج ضربه‌ای و یک جمله مشتق مرتبه چهارم جهت میرا کردن خطاهای نوسان بالا در میدان استفاده شود.

در سال ۱۹۸۶، جیمسن و ماوریلیس [۱۷] روش اولیه جیمسون را به صورت رابطه ۸ توسعه دادند.

$$\frac{d}{dt}(Q_i V_i) + R_i(Q) - D_i(Q) = 0 \quad (8)$$

که $R_i(Q)$ شامل مجموع شارهای لزج و غیرلزج است و $D_i(Q)$ جمله استهلاک مصنوعی را نشان می‌دهد. این جمله استهلاکی که باید بتواند هم نوسانات شدید ایجاد شده در اطراف موج ضربه‌ای را میرا کند و هم خطاهای فرکانس بالایی را از بین ببرد که در میدان به وجود می‌آید، معمولاً به صورت ترکیبی در نظر گرفته می‌شود. در شبکه‌های با سازمان، معمولاً از ترکیب یک جمله مشتق مرتبه دوم متغیرهای بقایی برای حذف نوسانات اطراف موج ضربه‌ای و یک جمله مشتق مرتبه چهارم جهت میرا کردن خطاهای نوسان بالا در میدان استفاده شود [۱۷]. در این تحقیق نیز برای شبکه عددی از جمله استهلاک مصنوعی ترکیبی استفاده شده است. مقادیر جمله‌های استهلاک مصنوعی برای جمله‌های مرتبه دوم و مرتبه چهارم به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۰/۰۰۸ در نظر گرفته شده‌اند.

۳- اعتبارسنجی

۳-۱- اعتبارسنجی مدل پلاسمای شایبی

سوسا و همکاران [۱۸]، جریان حول ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ را در حالت‌های با و بدون حضور عملگر DBD به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. به منظور اعتبارسنجی روش شایبی از نتایج مرجع ۱۸ استفاده شده است. در این شبیه‌سازی، عدد رینولدز و زاویه حمله به ترتیب برابر با ۴۶۶۴۳ و ۵/۳° است. شبیه‌سازی اثرات عملگر DBD در موقعیت ۰/۰۲ از طول وتر با ولتاژ ۳۰ kV و فرکانس ۱ kHz انجام شده است.

نحوه توزیع ضریب فشار برای حالتی که عملگر پلاسمایی روشن است، در مقایسه با نتایج تست تجربی در شکل ۴ ارائه

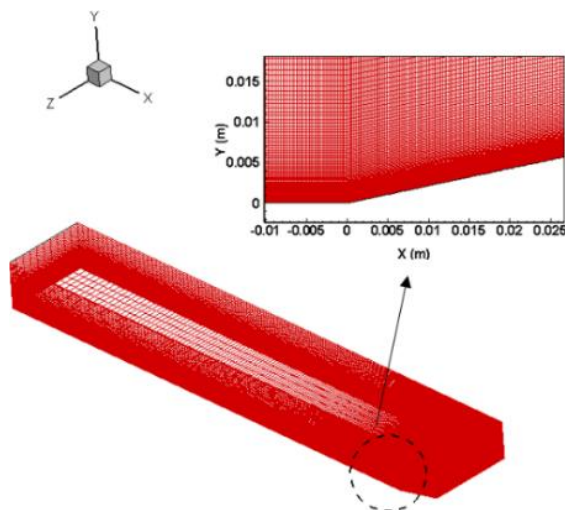
است، به طوری که با ریزتر شدن شبکه، تاثیر چشمگیری در بهبود کیفیت نتایج حاصل نشده است؛ بنابراین از شبکه شماره ۴ به عنوان شبکه مناسب جهت شبیه سازی عددی استفاده شده است.

۳-۲-۲- اعتبارسنجی جریان پایه دوبعدی

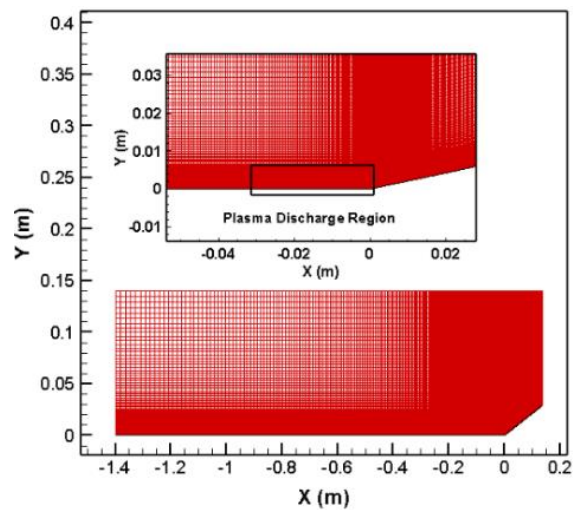
کانتور تغییرات عدد ماخ مربوط به شبیه سازی جریان پایه در مقایسه با نتایج عددی ارائه شده در مرجع ۱۱، در شکل ۸ ارائه شده است. نحوه تشکیل ناحیه جدایش و موج ضربه ای مایل در بالادست محل جدایش در مقایسه با نتایج شبیه سازی در

فاصله اولین گره از مرز دیوار سطح شیب دار به صورتی تنظیم شده است که شرایط $y^+ < 1$ ارضا گردد.

بررسی استقلال حل عددی از شبکه برای مدل سه بعدی روی ۶ شبکه مختلف با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ انجام شده است. در این بررسی، ارتفاع لایه مرزی در ناحیه شروع جدایش و همچنین فاصله مکان شروع جدایش جریان از مرکز سطح شیب دار (راس گوشه) به عنوان معیارهای مقایسه در نظر گرفته شده اند. در این راستا، نحوه تغییرات هریک از متغیرهای بالا در نمودار شکل ۷ ارائه شده است. باتوجه به شکل ۷، مشاهده می شود که درصد تغییرات متغیرهای مقایسه ای از شبکه شماره ۴ تا ۶ به حداقل رسیده



شکل ۶- شبکه محاسباتی در شبیه سازی سه بعدی



شکل ۵- شبکه محاسباتی در شبیه سازی دوبعدی

جدول ۱- متغیرهای استفاده شده جهت بررسی استقلال حل از شبکه سه بعدی

شماره شبکه	تعداد سلول ها	تعداد گره ها	ضخامت لایه مرزی (mm)	شروع جدایش (mm)	تغییرات شروع جدایش (%)
۱	۴۱۶۱۳۰	۴۴۳۱۲۳	۱۵/۶	-۳۳/۳	-
۲	۷۲۹۸۷۲	۷۷۵۴۶۵	۱۵/۲	-۳۱/۸	-۴/۵
۳	۱۱۵۸۵۸۶	۱۲۵۰۲۳۹	۱۴/۵	-۲۹/۱	-۸/۵
۴	۱۴۳۰۰۰۰	۱۵۸۲۵۸۱	۱۳/۸	-۲۸/۰	-۳/۸
۵	۱۸۹۴۷۵۰	۲۱۴۲۸۱۵	۱۳/۸	-۲۸/۰	۰/۰
۶	۲۳۶۰۹۳۰	۲۵۷۰۴۲۸	۱۳/۸	-۲۷/۹	-۰/۴

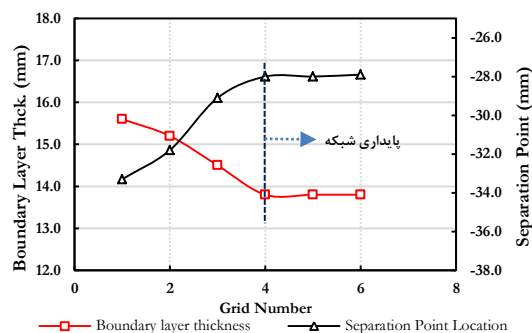
میلی‌متری در بالادست سطح شیب‌دار تشکیل شده است. کانتور ارائه شده در شکل ۸-الف نشان می‌دهد که شروع جدایش جریان به منزله کاهش مقدار تنش برشی دیواره از مقدار حداکثری خود، در فاصله ۲۸ میلی‌متری از سطح شیب‌دار رخ داده است؛ بنابراین از منظر پیش‌بینی نقطه شروع جدایش، نتایج پژوهش حاضر از دقت قابل قبولی برخوردار است، همچنین شکل کانتورها مشابه یکدیگر می‌باشند.

همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو کانتور ارائه شده در شکل ۸، موج ضربه‌ای مایل دقیقاً در بالادست ناحیه جدایش و با زاویه حدودی ۶۵ درجه نسبت به خطوط جریان ورودی تشکیل شده است؛ همچنین سرعت جریان بعد از موج ضربه‌ای برای هر دو کانتور ارائه شده در حدود ۱/۰۶ ماخ است. در مرجع ۱۱، ارتفاع لایه مرزی در محل شروع جدایش جریان تا ارتفاع ۱۴ mm توسعه یافته است. این در حالی است که در کانتور شکل ۸-الف، ارتفاع لایه مرزی در محل شروع تداخل موج ضربه‌ای- لایه مرزی برابر با ۱۳/۸ برآورد شده است.

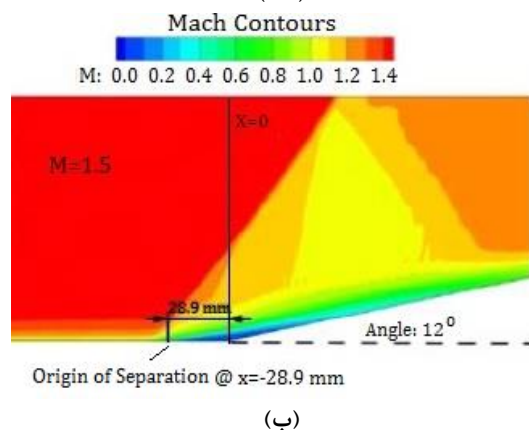
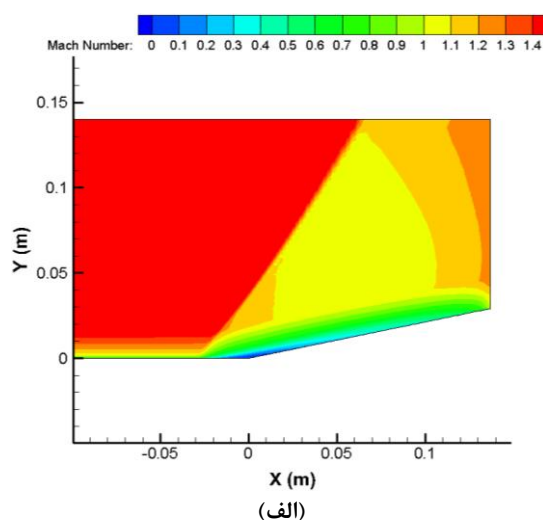
نحوه توزیع تنش برشی دیواره در نزدیکی سطح شیب‌دار در مقایسه با نتایج مرجع ۱۱ در شکل ۹ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نقاط شروع کاهش تنش برشی و شروع گردابه‌های ناشی از جدایش جریان (یا به عبارتی منفی شدن مقادیر تنش برشی) در شبیه‌سازی حاضر و نتایج در مرجع ۱۱ از تطبیق قابل قبولی برخوردار است؛ همچنین توزیع ضریب فشار متوسط محاسبه شده برای جریان بدون کنترل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. باتوجه به شکل ۱۰، افزایش توزیع فشاری در نزدیکی سطح شیب‌دار به دلیل ایجاد موج ضربه‌ای مایل بوده که این گرادیان فشاری منجر به جدایش جریان شده است.

۳-۲-۳- اعتبارسنجی جریان پایه سه‌بعدی

اعتبارسنجی بر روی نتایج شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی عبوری از روی سطح شیب‌دار و در حالت بدون کنترل، با استفاده از نتایج تجربی ارائه شده در مرجع ۱۱، انجام پذیرفته است. کانتور عدد ماخ برای جریان سه‌بعدی بدون کنترل و در مقطع میانی از مدل در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب ارائه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که برهمکنش موج ضربه‌ای



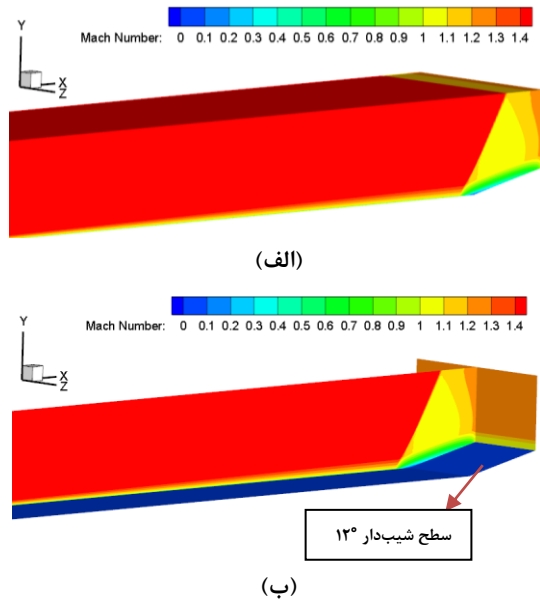
شکل ۷- نحوه تغییرات ضخامت لایه مرزی و موقعیت شروع جدایش جریان برای شبکه‌های عددی مختلف



شکل ۸- کانتور تغییرات عدد ماخ، (الف) در پژوهش حاضر، (ب) نتایج شبیه‌سازی [۱۱]

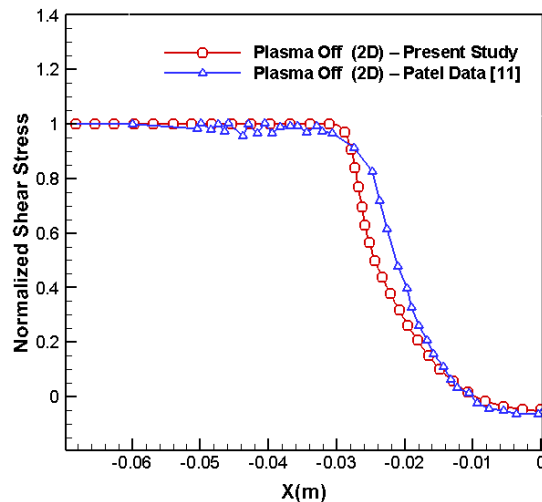
مرجع ۱۱، از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. با توجه به شکل ۸-ب نقطه شروع جدایش جریان در فاصله ۲۸/۹

برخوردار است. شایان ذکر است که اختلاف مشاهده شده در توزیع و در حوالی فاصله ۵۰ میلی‌متری در بالادست سطح شیب‌دار، به دلیل موج ضربه‌ای ضعیفی است که منشاء آن در ناحیه‌ای از سقف اتاقک آزمون تونل است، قابل استخراج است [۱۱].

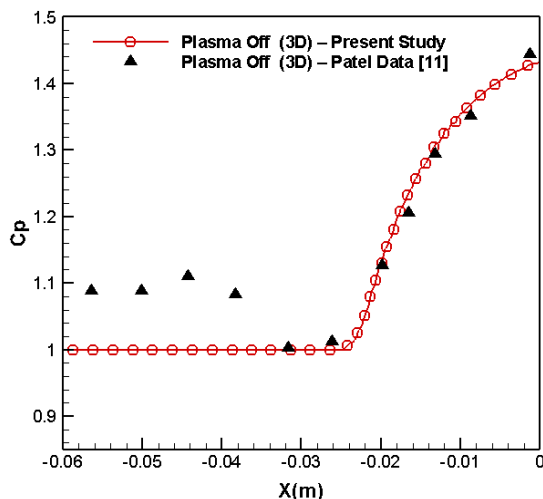


شکل ۱۱- کانتور عدد ماخ جریان عبوری از سطح شیب‌دار، الف) نمای سه‌بعدی و ب) در مقطع میانی از محور Z

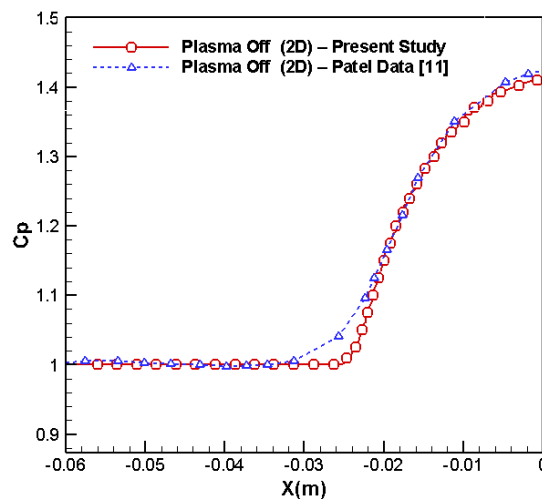
و لایه مرزی منجر به جدایش جریان و انتقال موج ضربه‌ای به بالادست محل شروع جدایش شده است. جریان جدا شده با گذر از سطح شیب‌دار، در فاصله ۵ میلی‌متر در پایین دست آن مجدداً به سطح شیب‌دار متصل می‌شود. توزیع ضریب فشار متوسط برای جریان سه‌بعدی و بدون کنترل در مقایسه با نتایج تجربی در شکل ۱۲ ارائه شده است. نحوه توزیع فشار روی سطح نزدیک به سطح شیب‌دار برای شبیه‌سازی حاضر و نتایج تجربی از تطابق قابل قبولی



شکل ۹- توزیع تنش برشی دیواره برای جریان بدون کنترل عبوری از روی سطح شیب‌دار ۱۲° و عدد ماخ ۱/۵



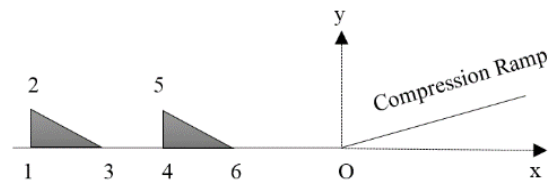
شکل ۱۲- توزیع ضریب فشار جریان سه‌بعدی عبوری از سطح شیب‌دار در حالت بدون کنترل در مقایسه با نتایج تجربی [۱۱]



شکل ۱۰- توزیع ضریب فشار برای جریان بدون کنترل عبوری از روی سطح شیب‌دار ۱۲° و عدد ماخ ۱/۵

۴- نتایج شبیه سازی عملگر DBD

کنترل جریان فراصوت عبوری از روی سطح شیب دار توسط دو عملگر DBD معمولی به صورت سری و با ولتاژ ورودی ۷۵ kV و فرکانس ۲ kHz انجام شده است. باتوجه به شکل ۳، در شبیه سازی حاضر، مقادیر ارتفاع ناحیه مثلثی شکل پلازما (a) و طول آن (b) به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۳ میلی متر و فاصله بین دو الکتروود (d) برابر با ۰/۱ میلی متر در نظر گرفته شده اند. شناسایی موقعیت عملگر پلازما با استفاده از لبه پایین دست الکتروود بیرونی یا همان موقعیت زاویه قائم ناحیه پلازما است. نقطه شروع عملگر پلازما مطابق با شکل ۱۳، در فاصله ۲۹ میلی متری از راس گوشه و تقریباً در محل شروع جدایش جریان (یا بعبارتی محل کاهش تنش برشی دیواره) در نظر گرفته شده است. در جدول ۲، اطلاعات ابعادی و موقعیت مکانی دیگر نقاط ناحیه تخلیه پلازما مطابق با شکل ۱۳، ارائه شده است. در شکل ۱۳، فاصله بین دو عملگر برابر با ۱ سانتی متر فرض شده است.



شکل ۱۳- شمانیکی از موقعیت عملگرهای DBD و ناحیه مثلثی شکل تخلیه پلازما در بالادست سطح شیب دار
جدول ۲- موقعیت مکانی نواحی تشکیل پلازما

نقاط عملگر	X_n (mm)	Y_n (mm)
0	۰/۰	۰/۰
۱	-۲۹	۰/۰
۲	-۲۹	+۱/۵
۳	-۲۶	۰/۰
۴	-۱۹	۰/۰
۵	-۱۹	+۱/۵
۶	-۱۶	۰/۰

کانتور تغییرات عدد ماخ و شیلرین عددی (که همان کانتور تغییرات چگالی است) برای جریان های پایه و با حضور دو ردیف عملگر DBD در شکل ۱۴ ارائه شده است. میدان الکتریکی اعمالی به عملگر DBD، موجب یونیزه شدن جریان هوای پیرامون ناحیه تخلیه پلازما شده است، که این موضوع موجب تزریق یک نیروی جسمی از فاصله حدوداً ۱/۵ میلی-متری از الکتروود بیرونی به سمت ناحیه جدایش شده است؛ بنابراین اعمال نیروی جسمی DBD (در محل فلش های شکل ۱۴) موجب تزریق ممنتم به ناحیه ای جدایش جریان، کاهش ضخامت لایه مرزی، تغییر موقعیت موج ضربه ای و همچنین تغییر ساختار آن شده است. بررسی های دقیق تر روی نتایج شکل ۱۴ نشان می دهند که عملگر پلاسمایی موجب ایجاد یک موج مایل ضعیف در ناحیه تشکیل پلازما، موجب افزایش زاویه موج ضربه ای مایل و انتقال آن به پایین دست شده است؛ همچنین حذف موج لاند و نقطه سه گانه^۱ و در نهایت بهبود بازایی فشار از دیگر تاثیرات عملگر DBD بر جریان فراصوت بوده است. موارد ذکر شده نشان می دهند که قابلیت استفاده از عملگرهای DBD در دهانه های ورودی فراصوت وجود دارد.

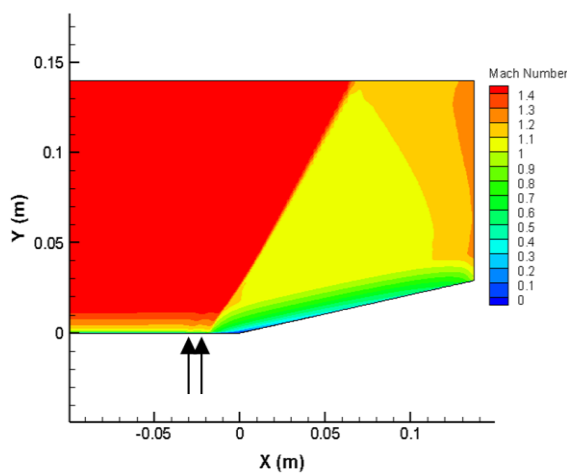
در شکل ۱۵ کانتورهای مربوط به مقدار بی بعد نیروی جسمی تولید شده در عملگر ارائه شده است. همانطور که مدل شایبی پیش بینی می کرد، توزیع نیروی تولیدی به صورت خطی و در ناحیه تقریباً مثلثی شکل ایجاد شده است. در شکل ۱۵ مشاهده می شود که مقدار بیشینه نیروی جسمی در مجاورت گوشه الکتروود بیرونی تولید شده است و با دور شدن از الکتروود بیرونی، مقدار توزیع نیرو کاهش می یابد.

توزیع تنش برشی دیواره برای جریان های دو و سه بعدی عبوری از روی سطح شیب دار با و بدون حضور عملگر در شکل ۱۶ ارائه شده است. در این شبیه سازی، مقدار ولتاژ و فرکانس میدان الکتریکی به ترتیب برابر با ۷۵ kV و ۲ kHz در نظر گرفته شده است. باتوجه به شکل ۱۶، عملگر DBD با اعمال نیروی جسمی در ناحیه جدایش جریان، منجر به جابجایی محل شروع افت تنش برشی (یا همان شروع ناحیه جدایش جریان) گردیده است. مقدار تنش برشی در محل حضور عملگر اول افزایش یافته و این موضوع موجب کاهش

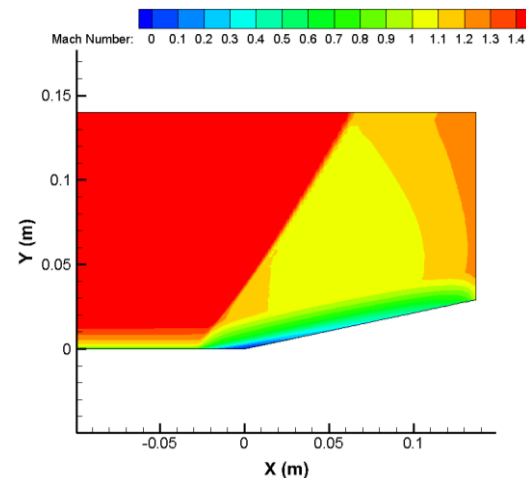
¹ Triple Point

مایل بوده که در نتیجه آن جدایش جریان اتفاق افتاده است. با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸، عملگر پلاسما، منجر به جابجایی نقطه جهش C_p و اعمال تغییراتی در روند توزیع آن در نواحی تشکیل پلاسما به خصوص در موقعیت مکانی عملگر بالادستی شده است. کاهش توزیع فشاری در محل عملگر اول شرایطی فراهم می‌آورد تا قدرت میدان الکتریکی عملگر افزایش یافته و در نتیجه موجب افزایش نیروی جسمی تولید شده و تاثیرگذاری بیشتر در کنترل جریان شده است.

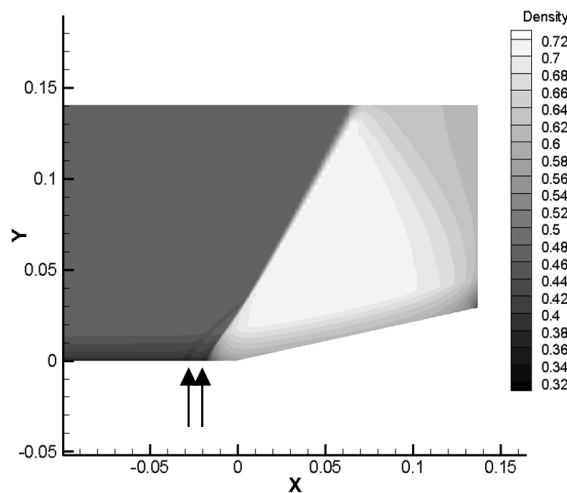
نقطه شروع جدایش جریان در حدود ۱۰ mm گردیده است. مشاهده می‌شود که نحوه توزیع تنش برشی روی دیواره در جریان‌های دو و سه‌بعدی به‌طور تقریبی یکسان بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار است. توزیع ضریب فشار برای جریان‌های دو و سه‌بعدی در دو حالت با و بدون حضور عملگر در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است. همانطور که پیشتر اشاره شد، افزایش توزیع فشاری در نزدیکی سطح شیب‌دار به دلیل ایجاد موج ضربه‌ای



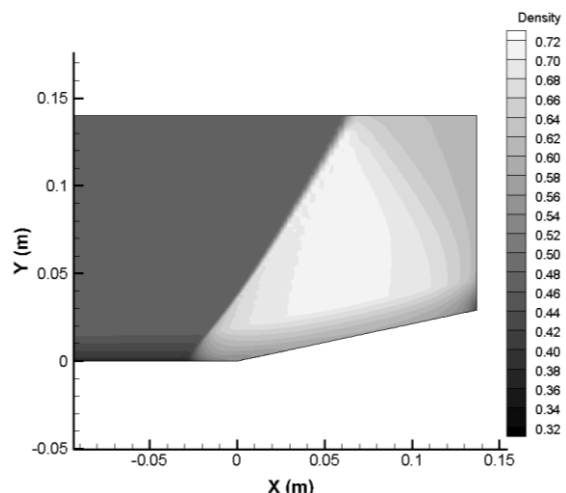
(ب) کانتور عدد ماخ



(الف) کانتور عدد ماخ

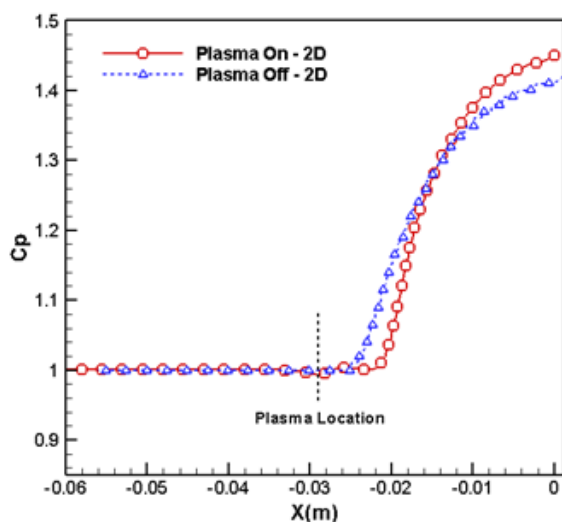


(د) کانتور شیلرین عددی

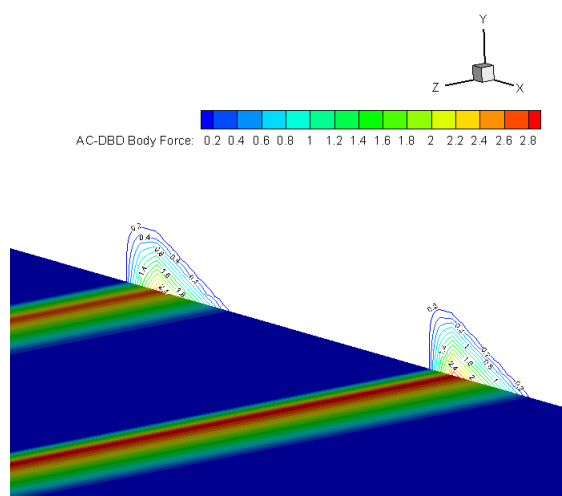


(ج) کانتور شیلرین عددی

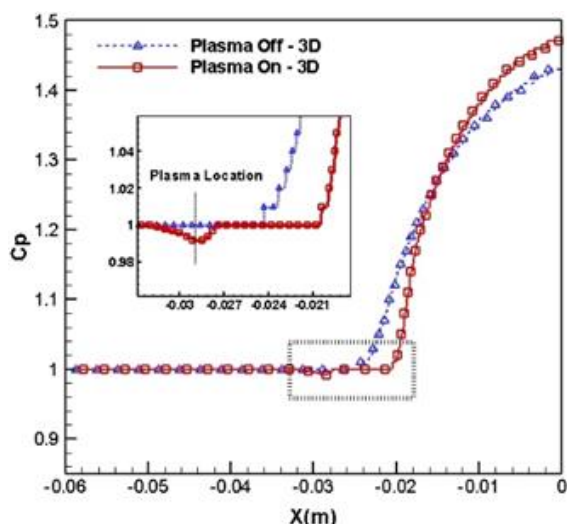
شکل ۱۴- کانتور عدد ماخ و شیلرین عددی در $Z=12.5$ cm (الف و ج) جریان بدون کنترل، (ب و د) با حضور دو ردیف عملگر DBD (۷۵ kV و ۲ kHz)



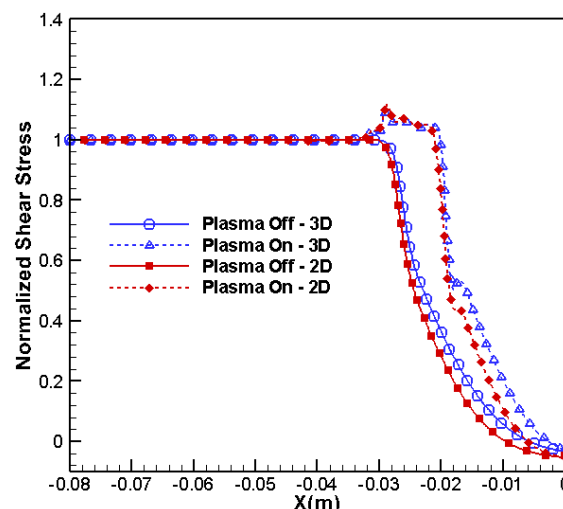
شکل ۱۷- توزیع ضریب فشار در دو حالت با و بدون حضور عملگر DBD در جریان دوبعدی



شکل ۱۵- کانتور توزیع نیروی جسمی در عملگر DBD



شکل ۱۸- توزیع ضریب فشار در دو حالت با و بدون حضور عملگر DBD در جریان سه بعدی



شکل ۱۶- توزیع تنش برشی دیواره در دو حالت با و بدون حضور عملگر DBD در جریان های دو و سه بعدی

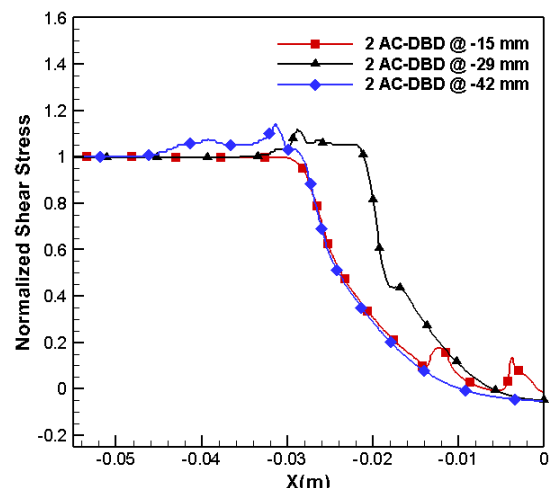
به مانند موقعیت و تعداد بهینه عملگر و همچنین اثر تغییرات فرکانس و ولتاژ میدان الکتریکی روی کنترل جدایش جریان مورد بررسی قرار گیرد. باتوجه به نتایج شکل های ۱۶، ۱۷ و ۱۸، از آنجایی که نتایج دو و سه بعدی جریان عبوری از سطح شیب دار در حالت های با و بدون حضور عملگر دارای تطبیق قابل قبولی با یکدیگر بودند، به منظور بررسی پارامتریک از مدل دوبعدی با هدف صرفه جویی در زمان و هزینه استفاده شده است.

۵- مطالعه پارامتریک عملگر DBD

نحوه تاثیرگذاری عملگرهای پلاسمایی بر جریان از منظر کمی و کیفی تا حد زیادی تابع پارامترهای عملکردی آن است؛ بنابراین بررسی پارامتریک این گونه عملگرها می تواند به شناسایی رفتار بهینه عملگر در کنترل جدایش جریان و نحوه تاثیرگذاری بر خواص جریان عبوری کمک شایانی نماید. در این بخش، هدف بر آن است که عدم قطعیت هایی

۱-۵- موقعیت بهینه عملگر پلاسمایی

نتایج مربوط به شبیه‌سازی با حضور دو ردیف عملگر در مکان‌های مختلف و با ولتاژ ۷۵ kV، فرکانس ۲ kHz در شکل ۱۹ ارائه شده است. نقطه شروع ناحیه مثلی شکل تخلیه پلاسمای مربوط به عملگر بالادست به گونه‌ای تنظیم شده که در موقعیت‌های ۴۲، ۲۹ و ۱۵ میلی‌متری از راس گوشه قرار گیرند. شکل ۱۹ نشان می‌دهند که قرارگیری عملگر در بالادست ناحیه جدایش ($x = -42$ mm) تأثیری در جابجایی نقطه شروع جدایش نداشته است. دلیل این موضوع سرعت بالای جریان در بالادست جدایش و دمپ شدن نیروی جسمی تزریق شده به سیال است. این شرایط برای حالتی نیز صادق است که عملگر در ناحیه جریان جدا شده ($x = -15$ mm) قرار دارد. قراردادن عملگر در فاصله ۱۵ mm از راس گوشه منجر به کاهش ناحیه تشکیل گردابه (مکانی که تنش برشی منفی است) شده، اما تأثیر قابل قبولی بر جابجایی محل شروع کاهش تنش برشی و بنابراین محل موج ضربه‌ای نداشته است؛ بنابراین بهترین حالت تأثیرگذاری عملگر، استفاده از آن دقیقاً در محل شروع جدایش است که در فاصله ۲۹ mm از شروع سطح شیب‌دار است. در این حالت، از آنجایی که توزیع فشاری جریان افزایش نیافته است و تنش برشی نیز در آستانه کاهش است، عملگر DBD موجب جابجایی موج ضربه‌ای و کاهش نقطه شروع جدایش به مقدار حدودی ۱۰ mm گردیده است.



شکل ۱۹- توزیع تنش برشی دیواره برای حالت‌های مختلف قرارگیری دو ردیف عملگر پلاسمایی (۷۵ kV و ۲ kHz)

۲-۵- تعداد ردیف‌های عملگر پلاسمایی

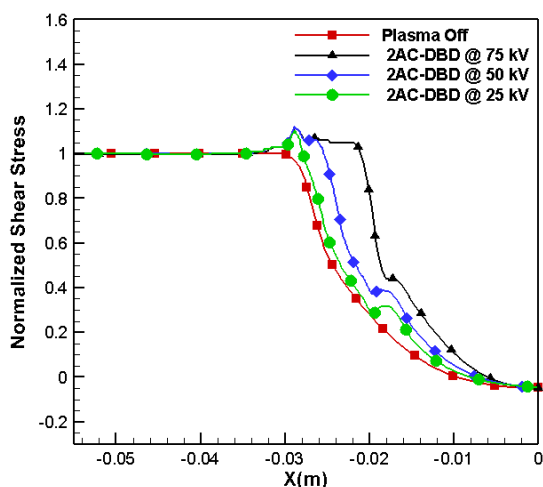
نتایج شبیه‌سازی با حضور یک، دو و سه ردیف عملگر با ولتاژ ۷۵ kV و فرکانس ۲ kHz در شکل ۲۰ ارائه شده است. نقطه شروع عملگر بالادستی در ۲۹ mm از راس گوشه و فاصله عملگرها ۱۰ mm است. نتایج شکل ۲۰ نشان می‌دهد که افزایش تعداد عملگرها باعث افزایش نیروی ممنتیم تزریق شده در نواحی متعدد به لایه مرزی جریان و در نتیجه کاهش ناحیه جدایش و جابجایی بیشتر موج ضربه‌ای به پایین دست می‌گردد؛ بنابراین یکی از راه‌کارهای مناسب در کنترل جریان با حضور عملگر DBD، استفاده از تعداد عملگرهای بیشتر با ولتاژ و جریان کمتر در ناحیه جدایش جریان است. این موضوع منجر به تزریق یکنواخت نیروی جسمی به لایه مرزی و بهبود کیفیت عملگر پلاسمایی می‌شود.

۳-۵- تأثیر فرکانس بر کنترل جدایش

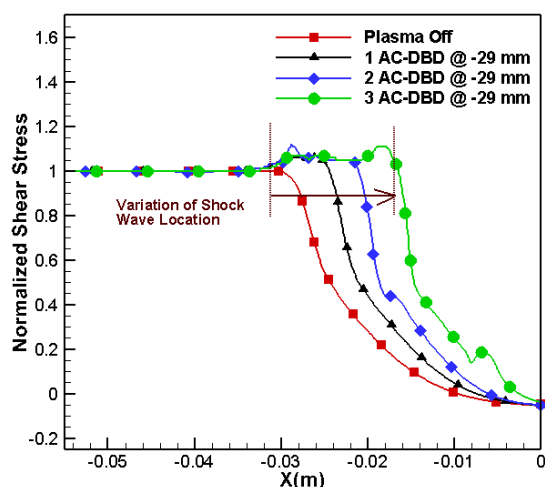
در شکل ۲۱، نتایج مربوط تأثیر افزایش فرکانس میدان الکتریکی در نحوه اثرگذاری عملگر پلاسمایی ارائه شده است. در این نتایج از دو ردیف عملگر با فاصله ۱۰ mm از یکدیگر و با قرارگیری در ۲۹ mm بالادست سطح شیب‌دار استفاده شده است. مقدار ولتاژ برابر با ۷۵ kV و فرکانس برابر با ۲، ۶ و ۱۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. باتوجه به شکل ۲۱، افزایش فرکانس میدان الکتریکی منجر به افزایش نیروی ممنتیم و کاهش بیشتر ناحیه جدایش شده است. با افزایش فرکانس از ۶ به ۱۰ کیلوهرتز، اختلاف بسیار زیادی در شروع جدایش ایجاد نشده است. از طرفی افزایش فرکانس موجب از بین رفتن ناحیه تشکیل گردابه‌های ناشی از جدایش جریان شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقدار فرکانس میدان الکتریکی تا حدی منجر به بهبود جدایش جریان می‌شود. افزایش بیش از فرکانس بهینه با هدف افزایش نیروی جسمی، تأثیر چشمگیری در کنترل جدایش جریان نخواهد داشت.

۴-۵- تأثیر ولتاژ بر کنترل جدایش

نتایج مربوط به مطالعه تأثیر افزایش ولتاژ بر عملکرد عملگرهای پلاسمایی در شکل ۲۲ قابل مشاهده می‌باشد. شبیه‌سازی جریان با حضور دو ردیف عملگر با فاصله ۱۰ mm از یکدیگر (و نقطه شروع در فاصله $x = ۲۹$ mm) انجام شده



شکل ۲۲- توزیع تنش برشی دیواره برای دو ردیف عملگر پلاسمایی با فرکانس ۲ kHz با ولتاژ ۲۵، ۵۰ و ۷۵ کیلوولت

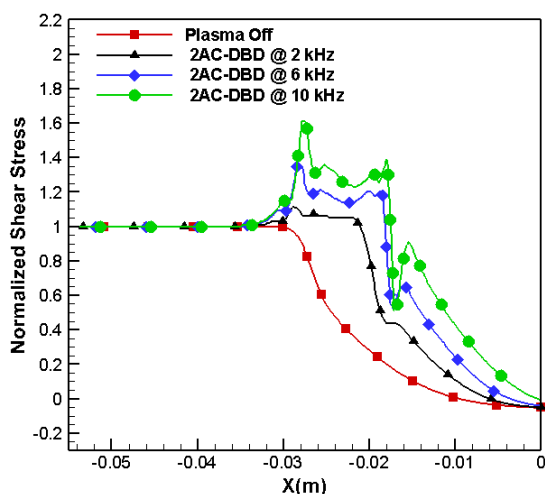


شکل ۲۰- توزیع تنش برشی دیواره برای حالت‌های یک، دو و سه ردیف عملگر (۲ kHz و ۷۵ kV)

در جدول ۳، نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک عملگر پلازما همراه با مقدار طول ناحیه جدایش جریان به‌عنوان متغیر قابل مقایسه ارائه شده است. بدین‌صورت که کاهش طول جدایش نشان از افزایش کارایی عملگر است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهند که بیشترین کارایی عملگر زمانی است که عملگر پلاسمایی دقیقاً در محل شروع جدایش قرار گرفته باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزایش تعداد عملگرها موجب بهبود کارایی سیستم کنترل می‌شود. گرچه افزایش مقدار فرکانس و ولتاژ میدان الکتریکی در کاهش طول ناحیه جدایش موثر است، افزایش فرکانس و ولتاژ به ترتیب از ۶ کیلوهرتز و ۵۰ کیلوولت به مقادیر بالاتر، تاثیر چشمگیری در کاهش جدایش ندارند.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تاثیر استفاده از عملگر پلاسمای DBD بر کنترل جدایش جریان فراصوت مورد بررسی قرار گرفت و جهت انجام شبیه‌سازی از معادلات ناویراستوکس با مدل آشفتگی $k\omega$ SST همراه با تابع دیوار و روش جیمسون استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دادند، استفاده از عملگر پلاسمای DBD منجر به کاهش جدایش جریان فراصوت گردیده است. نتایج استفاده از عملگر DBD نشان دادند که بهترین مکان برای قرارگیری عملگر، دقیقاً در بالادست ناحیه شروع جدایش و یا به عبارتی محل آغاز افت



شکل ۲۱- توزیع تنش برشی دیواره برای دو ردیف عملگر پلاسمایی ۷۵ kV با فرکانس های ۲، ۶ و ۱۰ کیلوهرتز

است. فرکانس شبیه‌سازی برابر با ۲ kHz در نظر گرفته شده است. نتایج عددی در شکل ۲۲ نشان می‌دهد که افزایش مقدار ولتاژ از ۲۵ به ۵۰ kV و سپس ۷۵ kV منجر به افزایش قدرت میدان الکتریکی و نیروی جسمی خروجی از عملگر و در نتیجه کاهش طول ناحیه جدایش و جابجایی موج ضربه‌ای مایل شده‌اند؛ همچنین قابل استنباط است که برای از بین بردن کامل ناحیه جدایش، ولتاژهای کمتر از ۵۰ کیلوولت قادر به ایجاد نیروی جسمی مناسب نبوده و در نتیجه کارایی قابل قبولی ندارند.

جدول ۳- نتایج بررسی پارامتریک عملگر DBD

طول جدایش (mm)	متغیرهای پلاسما	هدف از بررسی، شرایط شبیه‌سازی
۲۸/۰	$x = -15 \text{ mm}$	تاثیر موقعیت عملگرها، ۲ عملگر با ولتاژ ۷۵ kV و فرکانس ۲ kHz
۲۱/۲	$x = -29 \text{ mm}$	
۲۸/۰	$x = -42 \text{ mm}$	
۲۵/۲	$n=1$	تاثیر تعداد عملگر (۲ kV و ۷۵ kHz)
۲۱/۲	$n=2$	
۱۷/۱	$n=3$	
۲۱/۳	$f=2 \text{ kHz}$	تاثیر فرکانس میدان الکتریکی ۲ عملگر با ولتاژ ۷۵ kV
۱۸/۲	$f=6 \text{ kHz}$	
۱۸/۰	$f=10 \text{ kHz}$	
۲۷/۸	$V=25 \text{ kV}$	تاثیر ولتاژ میدان الکتریکی دو عملگر با فرکانس ۲ kHz
۲۵/۵	$V=50 \text{ kV}$	
۲۱/۴	$V=75 \text{ kV}$	

این موضوع موجب افزایش زاویه موج ضربه‌ای مایل و انتقال آن به پایین‌دست، موجب حذف موج لاندای و نقطه سه‌گانه و در نهایت بهبود بازیابی فشار شد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که قابلیت استفاده از عملگرهای DBD در دهانه‌های ورودی فراصوت وجود دارد و در آینده می‌توان از این ابزار کنترلی در بهبود عملکرد دهانه‌های ورودی به‌خصوص در شرایط خارج از نقطه طراحی استفاده کرد.

۷- مراجع

- [1] Saad MR (2013) Experimental studies on shock boundary layer interactions using micro-ramps at Mach 5. Dep. of Mech., Aer. & Civil Eng., Uni. of Manchester.
- [2] Smith A N, Babinsky H, Fulker JL Ashil PR (2004) Shock-wave/boundary-layer interaction control using streamwise slots in transonic flows. J Aircraft 41(3): 540-546.
- [3] Sarimurat MN, Dang TQ (2012) Shock management in diverging flow passages by blowing/suction, part 2: applications. J Propul Power 28(6): 1230-1242.
- [4] Falempin F, Wendling E, Goldfeld M, Starov AV (2006) Experimental investigation of starting process for a variable geometry air inlet operating from Mach 2 to Mach 8. 42nd AIAA Joint Pro. Conf. & Ex.

تنش برشی جریان بوده است. مطالعات پارامتریک نشان می‌دهد که یکی از راهکارهای افزایش تاثیرگذاری عملگرهای DBD، افزایش تعداد عملگرها و توزیع یکنواخت نیروی جسمی تزریق شده به جریان است.

همچنین نتایج نشان دادند که از دیگر راه‌های بهبود کنترل جریان، افزایش قدرت میدان الکتریکی پیرامون ناحیه تخلیه پلاسما از طریق افزایش مقادیر فرکانس و ولتاژ عملگر است؛ بنابراین افزایش مقدار فرکانس و ولتاژ میدان الکتریکی منجر به افزایش نیروی جسمی خروجی از عملگر DBD، کاهش ناحیه جدایش جریان و جابجایی موج ضربه‌ای گردید. از آنجایی‌که تغییر فرکانس از ۶ به ۱۰ کیلوهرتز تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کنترل جدایش جریان نداشت، می‌توان به این نتیجه رسید، گرچه افزایش فرکانس منجر به افزایش نیروی تخلیه شده در عملگر می‌شود، اما افزایش آن از مقدار مشخصی، تاثیر مثبتی بر کنترل جریان ندارد و حتی می‌تواند منجر به تشدید جدایش جریان گردد؛ بنابراین افزایش مقدار ولتاژ نسبت به افزایش فرکانس، تاثیرات بهتری در کنترل جدایش جریان فراصوت خواهد داشت.

نتایج ارائه شده در قالب کانتور شیلرین عددی نشان دادند که وجود عملگر پلاسما موجب تغییر ساختار موج ضربه‌ای در محل اعمال نیروی جسمی DBD گردیده است.

- [10] Porrello C, Roy S, Pimentel RG (2020) separation control inside a rectangular supersonic inlet using dielectric barrier discharge plasma actuators. AIAA Scitech, Orlando 2020.
- [11] Patel MP, Alan BC, Christopher CN (2012) Shock generation and control using dbd plasma actuators. SBIR Phase I Final Rep, NASA/CR.
- [12] Gonzalez P, Qin N (2020) Plasma models in hybrid RANS-LES simulation for backward facing step flow control. CMAS 52: 93-112.
- [13] Erfani R, Kontis K (2020) MEE-DBD plasma actuator effect on aerodynamics of a NACA0015 aerofoil: separation and 3D wake. CMAS 52: 75-92.
- [14] Im S, Do H, Cappelli M (2010) Dielectric barrier discharge control of a turbulent boundary layer in a supersonic flow. Jpn J Appl Phys 2 97(4): 041503.
- [15] William Graebel (2007) Advanced fluid mechanics. 1st edn, Academic Press.
- [16] Shyy W, Jayaraman B, Andersson A (2002) Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics. JPN J APPL PHYS 92(11): 6434-6443.
- [17] Jameson A, and Mavriplis D (1985) Finite volume solution of the two-dimensional euler equations on a regular triangular mesh, The 23rd Aero. Sci. Meeting, Nevada.
- [18] Sosa R, Artana G (2006) Steady control of laminar separation over airfoils with plasma sheet actuators. J Electrostat 64(7-9): 604-610.
- [5] Huang J, Hu B, Li Z, Zhang J, Qian Z, and Lan S (2020) The effects of plasma-based body force on flow separation suppression. CMAS 52: 113-129.
- [6] Abdollahzadeh M, Páscoa JC, Oliveira PJ (2014) Two-dimensional numerical modeling of interaction of micro-shock wave generated by nanosecond plasma actuators and transonic flow. J Comput Appl Math 270: 401-416.
- [۷] قرائیان م، رضانی زاده م، طیبی رهنی م، (۱۳۹۸) بررسی عددی کنترل فعال جدایش جریان آشفته از روی پله پسرو تحت تاثیر عملگر پلاسمایی DBD بخش دوم: تاثیر ولتاژ تغذیه در مد تحریک دائمی، بیست و چهارمین کنفرانس سالانه بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران، یزد، ایران.
- [۸] عبدی زاده غ، قاسملو س (۱۳۹۸) بررسی عددی اثر عملگر پلاسمایی بر ضرایب آیرودینامیکی یک ایرفویل تحت نوسان انتقالی، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۲۴۸-۲۳۹: ۴۹(۸۸).
- [۹] امیدى ج، مظاهری ک (۱۳۹۷) شبیه سازی عددی عملگر پلاسمایی به منظور کنترل جدایش لایه مرزی با استفاده از مدل الکتروستاتیک ارتقا یافته. مجله مهندسی مکانیک شریف ۳۳-۲۲: ۳۴(۱).