

کنترل جدایش جریان فرو صوت بر روی ایرفویل NACA0015 از طریق اعمال میدان الکترومغناطیس با مدلسازی عددی

احمد صداقت
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
محمدعلی بدری
استادیار، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

کاربرد نیروهای لورنتز ناشی از میدان های الکترومغناطیس در کنترل جریان روش مناسب و مورد توجهی می باشد. این نیرو در فرآیند حل عددی به صورت جمله های چشمه به معادلات حرکت سیال اضافه می شود. با این پدیده، مدلسازی عددی جریان فرو صوت با عدد ماخ ۰/۲ برای رژیم آشفته توسط روش حجم محدود TVD و با پیشروی زمانی ضمنی برای حل معادلات دو بعدی تراکم پذیر ناپیر-استوکس جریان سیال و با مدل آشفتگی بالدوین-لومکس در اطراف ایرفویل ها به منظور کنترل اثرهای ناخواسته جدایش انجام شده است. به کارگیری نیروی لورنتز نشان داده است که جدایش جریان روی ایرفویل NACA0015 به تاخیر افتاده یا حذف شده و کارایی هیدرو دینامیکی آن افزایش می یابد. با اعمال کنترل بر ایرفویل به کمک نیروی لورنتز، ضریب برا افزایش یافته و ضریب پسا تغییر چندانی ننموده است. این امر به افزایش زاویه وامانش منتهی گردیده است.

کلمات کلیدی: نیروی لورنتز، روش عددی MHD-TVD، ضریب مومنتم مغناطیسی

Subsonic Flow Separation Control over NACA0015 Airfoil Using Electromagnetic Fields by Numerical Modeling

A. Sedaghat Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology
M. A. Badri Assistant Professor, Subsea R&D Centre, Isfahan University of Technology

Abstract

Using Lorentz forces under effects of electro-magnetic fields for flow control is a suitable procedure. Lorentz forces may be added as a source term in the governing fluid flow equations. For this phenomenon, the numerical modeling of subsonic flow with the Mach number of 0.2 for turbulent flow regime using a finite-volume TVD scheme with implicit time marching for solving the two-dimensional compressible Navier-Stokes flows and the Baldwin-Lomax turbulence model around aerofoils are investigated to control undesirable effects of flow separation. By using Lorentz forces, it was shown that the separation was delayed or avoided over NACA0015 aerofoil and hydrodynamic performance was enhanced. Employing flow control using the Lorentz force, the lift coefficient was increased and the drag coefficient was not changed, considerably. Hence, the stall angle was increased.

Keywords: Lorentz Force, MHD-TVD numerical method, Magnetic momentum coefficient

۱- مقدمه

مرزی آشفته در آب دریا انجام دادند. آنها از یک پارامتر واکنشی N برای نشان دادن تأثیرات مشخصه‌های میدان الکترومغناطیس روی جریان برای اندازه‌های کم، متوسط و زیاد نیرو استفاده کردند. برگر [۷] و همکارانش نیز بررسی‌های تجربی و عددی به روش اختلاف محدود برای کنترل لایه مرزی آشفته در جریان کانال با اعداد رینولدز پائین انجام دادند. ویر و گریت [۸] و [۹] نیز مطالعات تجربی به منظور جلوگیری از جدایش به کمک اعمال نیروی‌های لورنتز در جهت جریان و موازی با دیوار، به کمک عملگری که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای صفحه تخت و ایرفویل‌ها برای آب دریا انجام داده‌اند که نتایج حاصل از کار آنها مبنای مقایسه کار حاضر قرار گرفته است.

اکبری و صداقت [۱۰ و ۱۱] مطالعات عددی در کنترل جدایش جریان روی صفحه تخت برای جریان تراکم‌ناپذیر و تراکم‌پذیر انجام داده‌اند. آنها با روش TVD مرتبه دوم و حلگر زمانرو ضمنی و اعمال نیروی لورنتز به صورت جمله چشمه در معادلات پایستاری اندازه حرکت، به بررسی حذف جدایش جریان در جریانهای فرو صوت و فراصوت بر روی صفحه تخت تحت زوایای حمله زیاد و وجود امواج ضربه‌ای پرداختند.

چنگ بینگ و همکاران [۱۲] یک موج شوک مایل را بر روی جریان شیبدار به کمک میدان مغناطیسی برای جریان‌های کم دمای فراصوتی به طور تجربی بررسی کردند. ایشان مشاهده نمودند که تحت میدان مغناطیسی جریان پلاسما حول سطح شیبدار سرعت بیشتری می‌گیرد و موج شوک مایل را ضعیف می‌کند. اخیراً زائو و همکاران [۱۳] جدایش جریان بر روی ردیف پره یک کمپرسور را با مجموعه ۲ و ۵ تایی الکترودهای تحریک در سمت مکش ردیف پره‌ها به طور عددی کنترل کردند. نتایج ایشان بهبود ۳۰ درصدی در افت فشار را نشان می‌دهد.

۲- معادلات حاکم بر حرکت سیال

شکل بی بعد معادلات ناویر-استوکس میانگین شده به شکل پایستار به صورت زیر است.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S \quad (1)$$

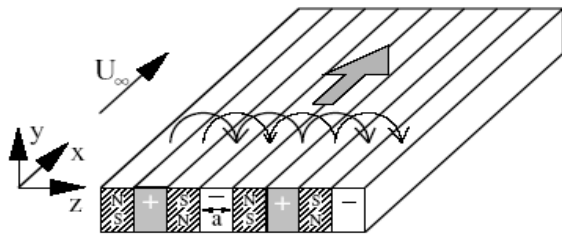
که U برداری از متغیرهای پایستار به صورت $U = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad e]^T$ است. U و v متغیر دشارتی سرعت، ρ چگالی و e انرژی کل به ازای واحد حجم به صورت $P = (\gamma - 1)[e - 0.5\rho(u^2 + v^2)]$ با فشار در ارتباط است. γ نسبت گرمای ویژه است و در اینجا شارهای $F = F^I + F^V$ و

کنترل جریان به منظور تصحیح میدان جریان برای ایجاد یک تغییر مطلوب روش مناسبی می‌باشد. جریان بر روی یک جسم مانند سطح بیرونی هواپیما یا زیر دریایی برای اهدافی از قبیل به تأخیر انداختن گذار، به تعویق انداختن جدایش، افزایش برا و کاهش پسای فشاری و اصطکاک پوسته‌ای قابل تصحیح است. روش‌های مختلف کنترل جریان برای رسیدن به اهداف فوق وجود دارد. قادلحق [۱] روش‌های کنترل جریان را در چند بخش تقسیم‌بندی کرده است. برای مثال می‌توان به روش‌هایی که روی دیوار یا دور از آن اعمال می‌شود و روش‌های فعال و غیر فعال اشاره کرد. وقتی کنترل جریان روی دیوار اعمال می‌شود، پارامترهای سطح شامل زبری، شکل سطح، تحذب، جابجایی دیوار، دما و تخلخل سطح برای ایجاد مکش و دمش می‌تواند روی نتایج نهایی تأثیر بگذارد. روش‌های دیگر کنترل جریان به فعال و غیر فعال موسومند. روشهای فعال مانند تولیدگرهای گردابه، فلپ‌ها و ریبلت‌ها نیازمند مصرف انرژی نیستند. ولی روشهای فعال مانند مکش و دمش، سطوح متحرک به انرژی مصرفی نیاز دارند. روش فعال دیگری که برای کنترل جریان اطراف ایرفویل استفاده می‌شود هیدرودینامیک مغناطیسی یا به اختصار MHD است که باعث افزایش برا و کاهش پسا می‌شود. از آغاز دهه ۵۰ میلادی به بعد، نحوه به کارگیری این نیرو در صنعت هوافضا و مکانیک موضوع تحقیقات جدی محافل علمی بوده است. گایلیتیس و لیلیاسیس [۲] اولین بار پیشنهاد استفاده از نیروهای لورنتز برای کنترل جریان را مطرح کردند. در تحلیل‌هایی که آنها در مورد لایه مرزی آرام انجام دادند، از یک نیروی لورنتز که در راستای خط جریان اعمال می‌شد برای افزایش نیروی پیش رانش و تأخیر در گذار جریان به حالت مغشوش، با جلوگیری از افزایش ضخامت لایه مرزی آرام استفاده کردند.

تسینوهر واشترن [۳] به صورت تحلیلی نشان دادند که نیمرخ لایه مرزی بلازیوس با اعمال نیروهای لورنتز پایدار می‌شود و عدد رینولدز بحرانی مقادیر بزرگتری تحت تأثیر این نیرو به خود می‌گیرد. لین [۴] در سال ۱۹۶۶ دریافت که عدد رینولدز بحرانی برای پروفیل اصلاح شده برابر 4×10^4 است. ناسنچوک و بران [۵] امکان کاهش نیروی پسا در لایه مرزی آشفته را با نیروی لورنتز آزمایش نمودند. آنها نیرو را در جهت عمود بر دیوار اعمال کردند. روش آنها بر خلاف روشهای دیگر بود که نیرو به طور مستقیم برای شتابدار کردن جریان در جهت جریان اعمال می‌شود. هنوز و استک [۶] مطالعه تجربی با ایجاد نیروی لورنتز توسط آرایش منظمی از الکترودها و مغناطیس‌ها (شکل ۱) برای نشان دادن تأثیر نیروی لورنتز روی یک لایه

زاویه انحنای سطح ایرفویل و η فاصله عمودی از سطح ایرفویل است و $u_t = u \cos \theta + v \sin \theta$ مولفه سرعت موازی با سطح ایرفویل می باشد.

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ J_0 B_0 \exp(-\frac{\pi}{a}\eta) \cdot \cos \theta \\ J_0 B_0 \exp(-\frac{\pi}{a}\eta) \cdot \sin \theta \\ J_0 B_0 \exp(-\frac{\pi}{a}\eta) u_t \end{bmatrix} \quad (3)$$



شکل ۱- عملگر الکترو مغناطیس برای ایجاد نیروی لورنتز موازی با دیوار



شکل ۲- نمایشی از محل اعمال نیروی لورنتز توسط عملگر الکترو مغناطیس

۳- روش حل عددی

تغییرات کل یک حل گسسته از قانون پایستاری اسکالر مانند زیر است [۱۴]:

$$TV(u) = \sum_i |u_{i+1} - u_i| \quad (4)$$

اگر رابطه $TV(u^{n+1}) \leq TV(u^n)$ برای یک روش عددی صادق باشد گفته می شود که آن روش دارای تغییرات کل از بین رفته است.

در کار حاضر از کد عددی توسعه یافته توسط صداقت [۱۶] که به روش حجم محدود TVD مرتبه دو دقت و با پیشروی زمانی ضمنی برای حل معادلات دو بعدی تراکم پذیر ناویر-استوکس جریان سیال و با مدل آشفتگی بالدوین-لومکس در اطراف ایرفویلها استفاده شده و با افزودن جملات چشمه مربوط به نیروهای لورنتز در معادلات اندازه حرکت تعمیم داده شده است. در این مطالعه برای مقایسه نتایج حاصل با نتایج تجربی حاصل از کار ویر و گرث [۸] و [۹] شرایط جریان آزاد به صورت

$G = G^I + G^V$ به دو بخش تقسیم شده است. اندیس ^I بیانگر جمله های غیر لزج و اندیس ^V بیانگر جمله های لزج یا جابجایی است.

جمله چشمه (S) در معادلات پایستاری برای حالت صفحه تخت با توجه به اینکه نیرو فقط در جهت موازی با دیوار وارد می شود مبنای جمله چشمه برای ایرفویل (رابطه ۳) واقع شده است. با بی بعد سازی معادله مومنتم در جهت X برای صفحه تخت جمله بدون بعد نیرو در معادله مومنتم مانند $F^* = \frac{J_0 B_0 L}{\rho_\infty U_\infty^2} \exp(-\frac{\pi}{a} y^* L)$ در نظر گرفته شده است.

$$F^I = \begin{bmatrix} \rho u \\ P + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (e + P)u \end{bmatrix}, \quad F^V = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xx} \\ -\tau_{xy} \\ -u\tau_{xx} - v\tau_{xy} + q_x \end{bmatrix}$$

$$G^I = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ P + \rho v^2 \\ (e + P)v \end{bmatrix}, \quad G^V = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xy} \\ -\tau_{yy} \\ -u\tau_{xy} - v\tau_{yy} + q_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

در محاسبات تنش ها و شارهای گرمایی در معادله فوق مدل صفر معادله ای بالدوین-لومکس به کار رفته است. این مدل آشفته، لایه مرزی را به دو قسمت درونی و بیرونی تقسیم می کند و لزجت آشفتگی را با ارتباط دادن به طول اختلاط پرانتل بدست می آورد. همچنین در مرجع [۳] به منظور تشابه با حالت اعمال دمش برای کنترل جدایش پارامتری به عنوان ضریب مومنتم هیدرودینامیک الکترومغناطیس مانند

$$C_{\mu EMHD} = \frac{2 J_0 B_0 a x_e - x_s}{\pi \rho_\infty U_\infty^2 c}$$

تعریف شده است. در این

رابطه $x_e - x_s$ کسری از طول وتر ایرفویل است که عملگر الکترومغناطیسی به صورت آرایشی از الکترودها و مغناطیسها (شکل ۱) روی سطح ایرفویل نصب شده است (شکل ۲). مقدار x_s در کار حاضر برابر 0.03748 ، مقدار x_e برابر با 0.84407 و مقدار عرض الکترودها a برای عملگر برابر با 0.01 در نظر گرفته شده است. جمله چشمه S برای ایرفویل از طریق رابطه (۳) بدست آمده است. با روش TVD، نیاز به محاسبه ماتریس های بردارهای ویژه برای جملات جمله های شار می باشد و وجود جمله چشمه در روند روش عددی اختلال ایجاد می کند. لذا جمله چشمه به روشی که در [۱۱] تشریح شده است، به درون جملات شار منتقل گردید. این نوآوری در کار عددی حاضر منجر به همگرایی سریعتر در مقایسه با حالتی است که جمله چشمه جداگانه در روند حل ظاهر شود و باعث کاهش فاصله زمانی های روش پیشرو زمانی شده است. در رابطه (۳)، θ

های سرعت در مختصات دکارتی به شکل $u_n = \frac{\eta_x u + \eta_y v}{\sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2}}$

نتیجه شده است و سرعت مماسی u_t بارابطه

$$u_t = \frac{\eta_y u - \eta_x v}{\sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2}}$$

بیان می شود. η_x, η_y متری‌های هندسی

است و تابع آنتروپی S با $s = \frac{p}{\rho^\gamma}$ تعریف گردیده است.

۳-۳- گام زمانی موضعی

شرط کورانت- فردریک- لویی^۳ شرطی است که پایداری یک فرآیند عددی در سیستم مختصات دکارتی برای جریانات تراکم پذیر دو بعدی را بیان می‌کند و به صورت $b_x = \frac{\Delta x}{(|u|+c)}, b_y = \frac{\Delta y}{(|v|+c)}, \Delta t_{ij} = CFL \min(b_x, b_y)$ در نظر

گرفته می‌شود. که c سرعت صوت محلی و u و v مولفه‌های سرعت و $\Delta x, \Delta y$ تغییرات گام مکانی و CFL عددی است که برای روش‌های عددی صریح کمتر از یک و برای روش‌های عددی ضمنی بزرگتر از یک در نظر گرفته می‌شود. در اینجا گام زمانی به صورت $\Delta t_{ij} = \frac{T}{1 + \sqrt{\frac{1}{A_{ij}}}}$ بیان شده است. T مقدار

ثابتی است که بیشینه گام زمانی مجاز در تمام میدان در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبات جریانهای آشفتنه از مقدار ۰٫۳ برای این متغیر استفاده شده است.

۴- انتخاب شبکه حل

به منظور بررسی شرط عدم وابستگی به شبکه از سه شبکه ۷۱×۵۱ ، ۲۸۱×۲۰۱ و ۱۴۱×۱۰۱ استفاده شده است. با مقایسه دقت نتایج مربوط به ضریب برآ، ضریب پسا و ضریب فشار حاصل از سه شبکه مختلف، شبکه بهینه برای ادامه محاسبات شبکه ۱۴۱×۱۰۱ انتخاب شده است.

جدول ۱- مقایسه ضرایب برآ و پسا برای سه شبکه بندی

مختلف ۷۱×۵۱ ، ۲۸۱×۲۰۱ و ۱۴۱×۱۰۱

ضریب پسا	ضریب برآ	شبکه بندی
۰٫۰۴	۰٫۴۳	۷۱×۵۱
۰٫۰۲	۰٫۵۱	۲۸۱×۲۰۱
۰٫۰۲	۰٫۵۱	۱۴۱×۱۰۱

با مقایسه مقادیر برآ و پسا در جدول ۱ و ضریب فشار در شکل ۳ ملاحظه می‌شود که مقدار ضریب برآ برای دو نوع شبکه بندی ۱۴۱×۱۰۱ و ۲۸۱×۲۰۱ تقریباً برابر $۰٫۵۱$ است. در حالیکه مقدار ضریب برآ برای شبکه بندی با تعداد گره‌های ۷۱×۵۱ تقریباً برابر $۰٫۴۳$ است که این مقدار با مقدار قبلی اختلاف

تراکم ناپذیر با عدد ماخ ۰٫۲ و عدد رینولدز برابر با ۳×۱۰^۵ و $۳٫۷ \times ۱۰^۵$ در نظر گرفته شده است.

۳-۱- شرایط اولیه و مرزی دیوار صلب

حل حالت پایا مستقل از شرایط اولیه است. اگر چه برای اطمینان از پایایی یک حل ویژه، استفاده از شرایط اولیه مناسب الزامی است. شرایط اولیه اعمال شده در این کار شامل تنظیم تمام کمیت‌ها معادل با مقادیر جریان آزادشان است. سرعت بی- بعد جریان آزاد و ضریب لزجت مولکولی بی بعد و چگالی بی بعد برابر واحد در نظر گرفته شده است و فشار بی بعد از رابطه $p_\infty = \frac{1}{\gamma M_\infty^2}$ محاسبه شده است.

شرایط مرزی برای جریان‌های لزج متکی به اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی از قبیل سرعت، فشار و دما است. شرط عدم لغزش، سرعت صفر روی دیواره را ایجاب می‌کند یعنی $u_{wall} = v_{wall} = 0$. با توجه به نظریه لایه مرزی گرادیان فشار عمودی در مجاورت دیوار قابل چشم پوشی است یعنی $(\frac{\partial p}{\partial n})_{wall} = 0$. این شرط برای لایه‌های مرزی پیوسته و یا جدا شده شرط مناسب و صحیحی است. در کد عددی تهیه شده، برونمایی مرتبه اول و دوم برای تخمین فشار دیواره بررسی شده است. سومین شرط مورد نیاز مربوط به دمای دیواره است. دمای دیواره با شرط آدیاباتیک بودن دیواره $q_{wall} = -k'(\frac{\partial T}{\partial n})_{wall} = 0$ در نظر گرفته شده است. دمای سیال بی بعد از رابطه $T = (1 + \frac{\gamma-1}{2} M_\infty^2)$ محاسبه شده است و چگالی در دیواره از معادله حالت با فشار و دمای دیواره بدست آمده است. برای مدل اغتشاشی، کمیت‌های مربوطه در دیواره برابر صفر در نظر گرفته شده است.

۳-۲- شرایط مرزی ناحیه دنباله^۱ و مرزی دور

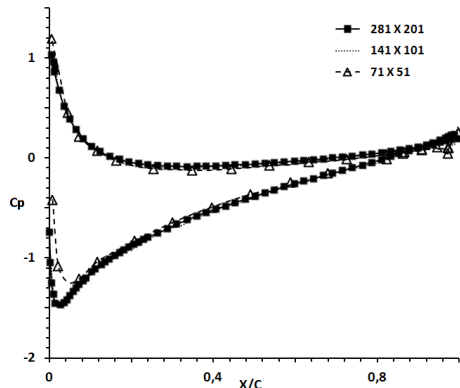
برای مقدار دهی متغیرهای پایستار در خط برش^۲ شبکه نوع C در ناحیه دنباله ایرفویل از یک میانگین ساده استفاده شده است. تمام کمیت‌های اغتشاشی در ناحیه دنباله معادل با کمیت‌های اغتشاشی در لبه فرار(ناحیه دم) در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی اعمال شده در مرزهای بیرونی بر مبنای تئوری ثابت ریمن یک بعدی، برای جریان عمود به مرزها به کار گرفته شده است. u_n مولفه سرعت عمودی به مرز بیرونی و C سرعت صوت محلی است. مولفه سرعت عمودی u_n از مولفه-

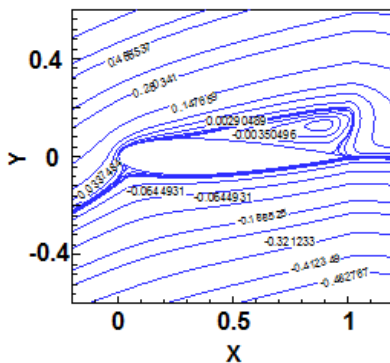
1. Wake Region

2. Branch-Cut

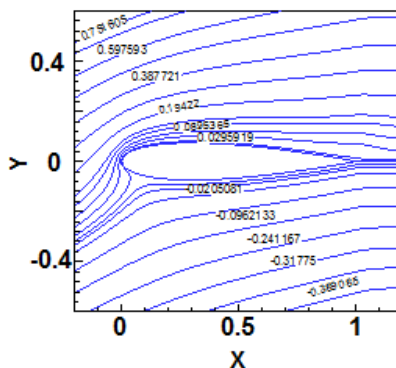
3. Courant-Fredrice-Lewy



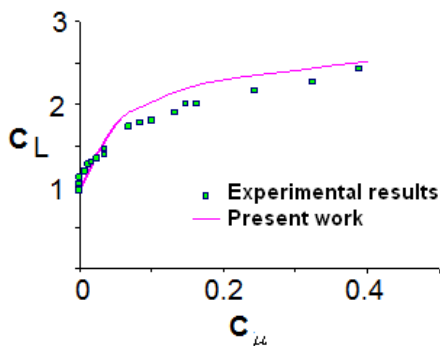
شکل ۳- ضریب فشار بر حسب طول بی بعد ایرفویل برای سه شبکه بندی مختلف 71×51 و 281×201 و 141×101



شکل ۴- کانتور خطوط جریان، زاویه حمله 18° و $C_{\mu} = 0.1$



شکل ۵- کانتور خطوط جریان، زاویه حمله 18° و $C_{\mu} = 0.48$



شکل ۶- منحنی تغییرات ضریب برا بر حسب ضریب مومنتم و مقایسه با نتایج تجربی [۸] برای زاویه حمله 18°

چشمگیری دارد و لذا از شبکه 141×101 برای حل جریان استفاده شده است.

۵- نتایج

در کار حاضر سعی شده تأثیر نیروهای لورنتز ایستا ناشی از میدان‌های الکترو مغناطیس به دست آمده توسط عملگری در کنترل جدایش جریان مورد ارزیابی قرار گیرد (شکل ۱). همچنین محل اعمال نیروهای لورنتز توسط این عملگر در (شکل ۲) آورده شده است. تأثیر این نیروها در مقایسه با نیروهای اینرسی سیال که بصورت ضریب مومنتم مغناطیسی C_{μ} بیان شده بررسی گردد. با وارد کردن این نیرو بعنوان جمله چشمه در معادلات پایستار درکد عددی TVD و مدل‌سازی جریان با عدد ماخ 0.2 و عدد رینولدز 3.7×10^5 برای ایرفویل NACA0015، برای مقایسه با نتایج تجربی یک جریان تراکم ناپذیر در مرجع [۱۵]، محاسبات انجام شده و اعتبار سنجی شده است. برای مطالعه عددی جریان اطراف ایرفویل از یک شبکه با سازمان 141×101 C استفاده گردیده است. مهمترین نتیجه به دست آمده کوچک شدن و حذف ناحیه جدایش جریان با افزایش ضریب مومنتم مغناطیسی است که در کانتورهای خطوط جریان شکل‌های ۴ و ۵ به خوبی نشان داده شده است. در واقع، $C_{\mu} = 0.48$ حذف کامل ناحیه جدایش را به ارمغان آورده است. همچنین نتیجه دیگری که حائز اهمیت است افزایش ضریب برا و کاهش ضریب پسا برای ضریب مومنتم مغناطیسی (تا مقدار $C_{\mu} = 0.5$) و نیز افزایش زاویه واماندگی با افزایش شدت نیروهای لورنتز می باشد (شکل‌های ۶ و ۷). در شکل ۶ نتایج عددی کنونی برای ضریب برا با نتایج تجربی مقایسه و کار حاضر اعتبار سنجی شده است.

با بهبود گرادیان فشار در ناحیه فوقانی ایرفویل و حذف اثرات جدایش جریان در ناحیه انتهایی لبه فرار شکستگی خطوط فشار در ناحیه جدایش به مرور با افزایش ضریب مغناطیسی برطرف شده است (کانتورهای فشار، شکل‌های ۸ و ۹). بنابراین، همانگونه که در شکل ۵ حذف جدایش جریان به وضوح دیده شد، اثرات ضریب مغناطیسی بر کانتورهای فشار و نقشی که در بهبود این خطوط دارند به خوبی دیده می‌شود.

[5] Nosenchuck, D. M., and Brown, G. L., "Discrete spatial control of wall shear stress in a turbulent boundary layer, in Near-Wall Turbulent Flows", Elsevier Science Publishers B.V., New York, pp. 689-698, 1993.

[6] Henoch, C. and Stace, J., "Experimental investigation of a salt water turbulent boundary layer modified by an applied streamwise magneto hydrodynamic body force", Phys. Fluids, Vol. 7, No. 1371, 1995.

[7] Timothy W., Kim, J. and Lee, C., "Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force", Phy. of Fluids, Vol. 12, No. 3, 2000.

[8] Weier, T., Gerbeth, G., Mutschke, G., Lielausis, O., and Lammers, G., "Separation control by stationary and time periodic Lorentz forces", SFB-Preprint, SFB609-03-2004, 2004.

[9] Weier, T., Fey, U., Gerbeth, G., Mutschke, G., and Avilov, V., "Boundary layer control by means of electromagnetic forces", ERCOFTAC Bulletin 44, pp. 36-40, 2000.

[10] Akbari, S. A., Sedaghat, A., and Azimian, A. R., "Computational Flow Separation Control using Electromagnetic fields", 14th Annual (International) Mechanical Engineering Conference Isfahan University of Technology, Isfahan, 2006.

[11] Sedaghat, A., Azimian, A. R., and Akbari, S. A., "Computational Stall Prevention Using Electromagnetic Fields", European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CDF, Egmond Ann Zee, Netherland, 2006.

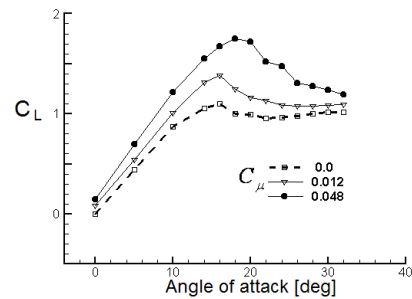
[12] Changbing, S., Yinghong, L., Bangqin, C., Jian, W., Jun, C., Yiwen, L., "MHD Flow Control of Oblique Shock Waves Around Ramps in Low-temperature Supersonic Flows", Chinese J. of Aeronautics 23, 22-32, 2010.

[13] Xiaohu, Z., Yinghong, L., Yun, W., Tao, Z., Yiwen, L., "Numerical Investigation of Flow Separation Control on a Highly Loaded Compressor Cascade by Plasma Aerodynamic Actuation", Chinese Journal of Aeronautics, No. 25, 349-360, 2012.

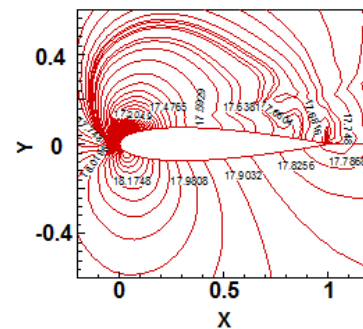
[14] Yee, H. C., "Implicit Total Variation Diminishing Schemes for Steady-State Calculations", J. Comp. Phys., 57, pp. 327-360, 1985.

[۱۵] نعمت الله فولادی، محمد رضا جهان نما، فضل الله محقق، کنترل جدایش جریان روی سطح هیدروفیل با استفاده از نیروهای الکترومغناطیس، سیزدهمین کنفرانس (بین المللی) سالانه مهندسی مکانیک، اردیبهشت ۱۳۸۴.

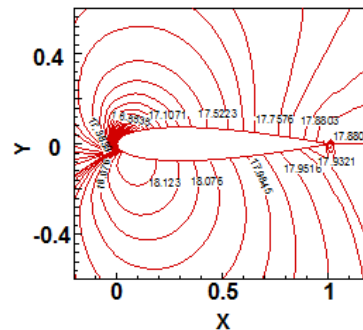
[16] Sedaghat, A., "A finite volume TVD approach to transonic flow computation", PHD Thesis, The University of Manchester, 1997.



شکل ۷- تأثیر افزایش ضریب مومنتم بر ضریب برا برای زوایای حمله مختلف



شکل ۸- کانتورهای فشار، زاویه حمله ۱۸° و C_mu = 0.1



شکل ۹- کانتورهای فشار، زاویه حمله ۱۸° و C_mu = 0.48

مراجع

[1] Gad-el-Hak, M., "Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management", Cambridge University Press, UK, 2000.

[2] Gailitis, A. K. and Lielausis, O. A., on the possibility of drag reduction of a flat plate in an electrolyte, Appl. Magneto hyd., Trudy Inst. Fiziky AN Latvia SSR 12, pp. 143, 1961.

[3] Tsinober, A. B., Shtern, A. G., "Possibility of increasing the flow stability in a boundary layer by means of crossed electric and magnetic fields", Magneto hyd., Vol. 3, pp. 152, 1967.

[4] Lin, C. C., "the Theory of Hydrodynamic Stability", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1966.