



# مطالعه عددی تاثیر میدان الکترومغناطیس در کنترل جدایش جریان بروی ایرفویل‌ها

سید علی اکبری<sup>۱</sup>، احمد صداقت<sup>۲</sup>، احمد رضا عظیمیان<sup>۳</sup>

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک.

Email: sayedaliakbari@yahoo.ca

## چکیده

در این مقاله به مدلسازی عددی جریان مادون صوت با عدد ماخ ۰/۲ و کنترل اثرات ناخواسته جدایش برای رژیم جریان مغشوش پرداخته شده است. تمرکز این کار بروی کنترل جریان توسط نیروهای لورنتز ناشی از میدان های الکترومغناطیس است. این نیرو در فرآیند حل عددی بصورت جمله های منبع به معادلات حرکت سیال اضافه شده است. نتایج حل عددی نشان می دهد که بکارگیری نیروی لورنتز باعث به تاخیر انداختن و یا حذف جدایش جریان بروی ایرفویل شده و به تبع آن کارایی هیدرو دینامیکی افزایش می یابد. پس از اعمال کنترل برای ایرفویل NACA0015 بکمک نیروی لورنتز، ضریب لیفت بیشتر شده و ضریب درگ تغییر چندانی نمی کند که این امر باعث افزایش زاویه استال می شود.

واژه های کلیدی: نیروی لورنتز- روش عددی MHD-TVD- ضریب مومنتم مغناطیسی- جمله منبع

## مقدمه

کنترل جریان بصورت دستکاری کردن میدان جریان برای ایجاد یک تغییر مطلوب تعریف می شود. جریان از روی یک جسم مانند سطح بیرونی هواپیما یا زیر در یایی را می توان برای اهداف زیر دستکاری کرد:

۱- به تاخیر انداختن گذار

۲- به تعویق انداختن جدایش

۳- افزایش لیفت

۴- کاهش درگ فشاری و اصطکاک پوسته ای

روشهایی که برای نائل شدن به اهداف بالا مورد استفاده قرار می گیرد را روشهای کنترل جریان می نامند. دسته بندی های مختلفی برای روشهای کنترل جریان وجود دارد. گدال-هک [۱] روشهای کنترل جریان را در چند بخش تقسیم بندی کرده است. که برای مثال می توان به روشهای زیر اشاره کرد.

• روشهایی که روی دیوار یا دور از آن اعمال می شود:

وقتی کنترل جریان روی دیوار اعمال می شود پارامترهای سطح شامل زبری، شکل سطح، تحدب، جابجایی دیوار، دما و تخلخل سطح برای ایجاد مکش و دمش می تواند روی نتایج نهایی که در بالا ذکر شد تاثیر بگذارد. گرم و سرد کردن سطح نیز می تواند از طریق ایجاد گرادیانهای دانسیته و ویسکوزیته روی جریان تاثیر گذار باشد. همچنین روشهایی که دور از دیوار (سطح) اعمال

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- استادیار

۳- استاد



می شوند مانند بمباران کردن لایه‌های برشی از طریق امواج آکوستیک از بیرون سطح، شکست ادیهای بزرگ بوسیله وسایلی که دور از دیواراند روشهای مفید و سودمندی هستند.

- روشهای اکتیو و پسیو:

روش دومی که برای دسته بندی روشهای کنترل جریان وجود دارد به روشهای اکتیو و پسیو موسومند. روشهای پسیو مانند تولید کننده های ورتکس، فلپ ها، ریبلت ها نیازمند مصرف انرژی نیستند. ولی روشهای اکتیو نیاز به انرژی مصرفی دارند مانند مکش و دمش، سطوح متحرک. روش اکتیو دیگری که برای کنترل جریان اطراف ایرفویل استفاده می شود هیدرو دینامیک مغناطیسی یا به اختصار MHD است که باعث افزایش لیفت و کاهش درگ می شود. جریان یک سیال الکترولیت در داخل میدانهای الکتریکی و مغناطیسی باعث اعمال نیروهای حجمی (نیروهای لورنتز) به ذرات سیال می گردد.

از آغاز دهه ۵۰ میلادی به بعد، نحوه بکار بستن این نیرو در صنعت هوافضا و مکانیک به عنوان یک بحث جدی موضوع تحقیقات جدی محافل علمی بوده است. ایجاد نیروی پیشران برای یک زیر دریایی و یا کشتی، ایجاد نیروی پیشران در جریان مافوق صوت و ماورای صوت، کنترل شوک جریان در دهانه ورودی جت، کنترل پدیده‌های پیچیده در جریان سیال در مجاورت دیواره از قبیل لایه مرزی، توربولانس، گردابه جریان، و جدایش از جمله کاربرهای این علم به شمار می رود.

### تاریخچه ای از کارهای انجام شده

گالیلیتیس و لیلایسیس<sup>۱</sup> [۲] اولین بار پیشنهاد استفاده از نیروهای لورنتز برای کنترل جریان را مطرح کردند. در تحلیل هایی که آنها در مورد لایه مرزی آرام انجام دادند، از یک نیروی لورنتز که در راستای خط جریان اعمال می شد برای افزایش نیروی پیش رانش و تاخیر در گذار جریان به حالت مغشوش، بوسیله جلوگیری از افزایش ضخامت لایه مرزی آرام استفاده کردند. تسینوبر واشترن<sup>۲</sup> [۳] نیز نشان دادند که پروفیل لایه مرزی بلازیوس با اعمال نیروهای لورنتز پایدار می شود. لین<sup>۳</sup> [۴] در سال ۱۹۶۶ دریافت که عدد رینولدز بحرانی برای پروفیل اصلاح شده از مرتبه  $4 \times 10^4$  است. که این مقدار کمتر از مقدار عدد رینولدز بحرانی برای پروفیل لایه مرزی بلازیوس است. اگر چه پروفیل جدید لایه مرزی به سرعت پروفیل بلازیوس رشد نمی کند ولی پایدارتر از آن است.

بران و ناسنچوک<sup>۴</sup> [۵] امکان کاهش نیروی درگ در لایه مرزی توربولانت را با استفاده از نیروی لورنتز مورد آزمایش قرار دادند. آنها نیرو را در جهت عمود بر دیوار اعمال کردند. روش آنها بر خلاف روشهای بعدی بود که نیرو بطور مستقیم برای شتابدار کردن جریان در جهت جریان اعمال می شود. در آزمایش آنها نیروی لورنتز بطور غیر مستقیم برای تاثیر بروی ساختار های توربولانس اعمال می شد.

هنوچ و استک<sup>۵</sup> [۶] مطالعه تجربی بوسیله ایجاد نیروی لورنتز توسط آرایش منظمی از الکترودها و مغناطیسها (شکل ۱) برای نشان دادن تاثیر نیروی لورنتز روی یک لایه مرزی توربولانس در آب دریا انجام دادند. در کار تجربی آنها نیرو در راستای خط جریان در جهت پائین دست و بالا دست اعمال شد. آنها در یافتند که اصطکاک دیواری افزایش می یابد. علاوه براین ضخامت لایه مرزی کاهش یافته و شدت توربولانس در عرض لایه مرزی متوقف شد. آنها از یک پارامتر واکنشی  $N$  (که در بخش مربوطه توضیح داده می شود) برای نشان دادن تاثیرات مشخصه‌های میدان اکترومغناطیس روی جریان برای اندازه‌های کم، متوسط و زیاد نیرو استفاده کردند.

1-Gailitis & Lielausis  
2-Tsinober & Shtern  
3-Lin  
4-Nosenchuck & G. L. Brown  
5-Henoch & J. Stace



در مقادیر کوچک این کمیت  $N$ ، تنها ناحیه نزدیک دیواره بوسیله نیرو تحت تاثیر قرار می‌گرفت. وقتی که مقدار این کمیت بزرگتر می‌شد، جریان متوسط تحت تاثیر قرار نمی‌گرفت ولی نوسانات تنش برشی دیواره و شدت توربولانس که در ناحیه های پائین تر لایه مرزی متوقف می شد تا ۳۰ درصد مقادیر اولیه افزایش می‌یافت. در مقادیر بزرگتر نیرو، اصطکاک پوسته ای و شدت توربولانس افزایش یافت. در تمام مواردی که در بالا ذکر شد نیرو در جهت پائین دست جریان اعمال می‌شود. برای حالتی که نیرو در جهت بالا دست جریان اعمال می‌شود سرعت متوسط کاهش و شدت توربولانس افزایش می‌یابد.

برگر<sup>۱</sup> [۷] و همکارانش نیز بررسی های تجربی و عددی برای کنترل لایه مرزی توربولانت در جریان کانال با اعداد رینولدز پائین انجام دادند.

ویر و گریت<sup>۲</sup> [۹ و ۸] نیز مطالعات تجربی به منظور جلوگیری از جدایش به کمک اعمال نیروی های لورنتز در جهت جریان و موازی با دیواره، به کمک عملگری<sup>۳</sup> که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای صفحه تخت و ایرفویل ها برای آب دریا انجام داده اند. که نتایج حاصل از کار آنها مبنای مقایسه ای برای کار حاضر قرار گرفته است.

اخیراً اکبری و صداقت [۱۱ و ۱۰] مطالعات عددی در مورد کنترل جدایش جریان روی صفحه تخت برای جریان تراکم ناپذیر و تراکم پذیر انجام داده اند.

### روش عددی

روشهای عددی TVD یا تغییرات کل از بین رونده، به روشهایی گویند که در آن تغییرات کل حل هر جواب فیزیکی قابل قبول با افزایش زمان در فضای حل بتدریج کم و محو می‌شود. لکس و وندروف [۱۲] مفهوم تغییرات کل از بین رونده را بر مبنای یک خاصیت مهم از قانون بقای اسکالر (معادله ۱) ارائه داد.

$$u_t + f_x = 0 \quad (1)$$

او بیان کرد که تغییرات کل هر حل قابل قبول فیزیکی که توسط رابطه زیر مشخص می‌شود با افزایش زمان تغییر نمی‌کند.

$$TV = \int \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| dx \quad (2)$$

تغییرات کل یک حل گسسته از قانون بقای اسکالر بصورت زیر است

$$TV(u) = \sum_i |u_{i+1} - u_i| \quad (3)$$

اگر رابطه زیر برای یک روش عددی صادق باشد گفته می‌شود که آن روش دارای تغییرات کل از بین رونده است.

$$TV(u^{n+1}) \leq TV(u^n) \quad (4)$$

### معادلات حاکم بر حرکت سیال

برای بسط یک روش عددی موثر، استفاده از شکل بدون بعد معادلات حاکم بر جریان سیال بسیار مناسب است. این کار باعث می‌شود که کمیت‌های بدون بعد در یک محدوده خاص قرارگیرند. بنابراین مقادیر جریان آزاد برای بی بعد کردن کمیت های زیر استفاده می‌شود.

1-Berger  
2- Weier & Gerbeth  
3-Actuator



شکل بدون بعد معادلات ناویر- استوکس در مختصات کارتزین و به شکل بقائی بصورت زیر است.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S \quad (5)$$

که  $U$  برداری از متغیرهای بقائی بصورت زیر است.

$$U = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad e]^T \quad (6)$$

که  $u$  و  $v$  متغیرهای کارتزین سرعت و دانسیته  $\rho$  و  $e$  انرژی کل به ازای واحد حجم است که بصورت زیر با فشار در ارتباط است.

$$P = (\gamma - 1) \left[ e - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \right] \quad (7)$$

که  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه است.

فلاکسهای  $F$  و  $G$  را می توان به دو بخش تقسیم کرد. اندیس  $I$  بیانگر جمله های غیر لزج و اندیس  $V$  بیانگر جمله های لزج یا جابجایی است.

$$F = F^I + F^V \quad (8)$$

$$G = G^I + G^V$$

که می توان آنها را بصورت زیر نشان داد.

$$F^I = \begin{bmatrix} \rho u \\ P + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (e + P)u \end{bmatrix}, \quad F^V = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xx} \\ -\tau_{xy} \\ -u\tau_{xx} - v\tau_{xy} + q_x \end{bmatrix} \quad (9)$$

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

جمله  $S$  در معادلات بقائی برای حالت صفحه تخت با توجه به اینکه نیرو فقط در جهت موازی با دیوار وارد می شود بصورت زیر است.

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ J_0 B_0 \exp\left(-\frac{\pi}{a} \eta\right) \\ 0 \\ J_0 B_0 \exp\left(-\frac{\pi}{a} \eta\right) u \end{bmatrix} \quad (10)$$

با بی بعد کردن معادله مومنتم در جهت  $X$  برای صفحه تخت جمله بدون بعد نیرو در معادله مومنتم بصورت زیر می شود.

$$F^* = \frac{J_0 B_0 L}{\rho_\infty U_\infty^2} \exp\left(-\frac{\pi}{a} y^* L\right) \quad (11)$$

با در نظر گرفتن  $L$  برابر با  $C$  طول وتر ایرفویل و با توجه به رابطه بالا می توان پارامتر بی بعدی تعریف کرد که معمولا در مسائل هیدر و دینامیک مغناطیسی برای تعیین شدت نیروی لورنتز مورد استفاده قرار می گیرد.



پارامتر واکنشی  $N$  بصورت زیر تعریف می شود :

$$N = \frac{J_0 B_0 c}{\rho_\infty U_\infty^2} \quad (12)$$

که نسبت نیروهای الکترومغناطیس به نیروهای اینرسی را توصیف می کند. همچنین در مرجع [۳] بمنظور تشابه با حالت اعمال دمش برای کنترل جدایش پارامتری بعنوان ضریب مومنتم هیدرو دینامیک الکترو مغناطیس بصورت زیر تعریف شده است.

$$C_{\mu EMHD} = \frac{2 J_0 B_0 a}{\pi \rho_\infty U_\infty^2} \frac{x_e - x_s}{c} \quad (13)$$

که در این رابطه  $(x_e - x_s)$  کسری از طول وتر ایر فویل است که عملگر الکترو مغناطیسی (بصورت آرایشی از الکترودها و مغناطیسها (شکل ۱)) روی سطح ایر فویل نصب شده است (شکل ۲). مقدار  $x_s$  در کار حاضر برابر  $0.03748$ ، مقدار  $x_e$  برابر با  $0.084407$ ، و مقدار عرض الکترودها  $a$  برای عملگر برابر با  $0.01$  در نظر گرفته شده است.

جمله منبع  $S$  برای ایرفویل بصورت زیر نوشته می شود.

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ J_0 B_0 \exp\left(-\frac{\pi}{a}\eta\right) \cos \theta \\ J_0 B_0 \exp\left(-\frac{\pi}{a}\eta\right) \sin \theta \\ J_0 B_0 \exp\left(-\frac{\pi}{a}\eta\right) u_t \end{bmatrix} \quad (14)$$

در رابطه بالا  $\theta$  زاویه انحنای سطح ایر فویل و  $\eta$  فاصله عمودی از سطح ایرفویل است و  $u_t$  مولفه سرعت موازی با سطح ایرفویل و برابر است با:

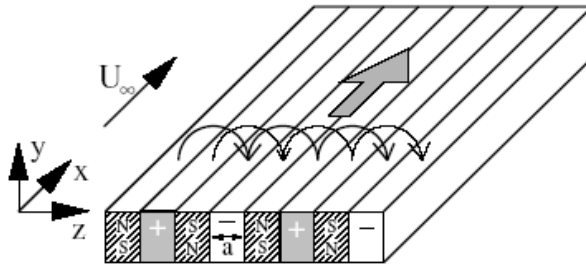
$$u_t = u \cos \theta + v \sin \theta \quad (15)$$

### نتیجه گیری

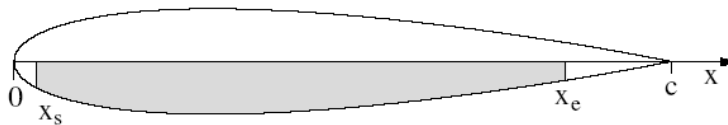
در کار حاضر سعی بر آن شده که تاثیر نیروهای لورنتز ایستا ناشی از میدانهای الکترو مغناطیس بدست آمده توسط عملگری که در شکل ۱ نشان داده شده است در کنترل جدایش جریان مورد ارزیابی قرار داده شود. همچنین تاثیر این نیروها را در مقایسه با نیروهای اینرسی سیال که بصورت ضریب مومنتم مغناطیسی  $C_\mu$  بیان شده بررسی گردد. با وارد کردن این نیرو بعنوان ترم منبع در معادلات بقای درکد عددی TVD و مدلسازی جریان با عدد ماخ  $0.2$  و عدد رینولدز تقریباً  $3 \times 10^5$  برای ایرفویل NACA0015، برای مقایسه با یک جریان تراکم ناپذیر در مرجع [۸]، محاسبات انجام شد. برای مطالعه عددی جریان اطراف ایرفول از یک شبکه سازمان یافته  $141 \times 101$  نوع C که در شکل ۳ نشان داده شده است استفاده شده است. مهمترین نتیجه بدست آمده حاصل از این کار حذف ویا کوچک کردن ناحیه جدایش جریان با افزایش ضریب مومنتم مغناطیسی بود که در کانتورهای خطوط جریان شکل های ۴ و ۵ و ۶ بخوبی نشان داده شده است. همچنین نتیجه دیگری که حائز اهمیت است

افزایش ضریب لیفت و کاهش ضریب درگ برای ضریب مومنتم مغناطیسی (تا مقدار  $C_{\mu} = 0.05$ ) و نیز افزایش زاویه استال با افزایش شدت نیروهای لورنتز در شکل های ۷ و ۹ نشان داده شده است. البته در کار عددی حاضر کاهش ضریب درگ تا مقدار  $C_{\mu} = 0.05$  مشاهده می شود و برای مقادیر بیشتر  $C_{\mu}$  ضریب درگ تقریباً ثابت مانده است. نتیجه دیگری که می توان به آن اشاره کرد پایدار شدن جریان با افزایش شدت نیروهای لورنتز است که در کانتورهای فشار (شکل های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲) نشان داده شده است.

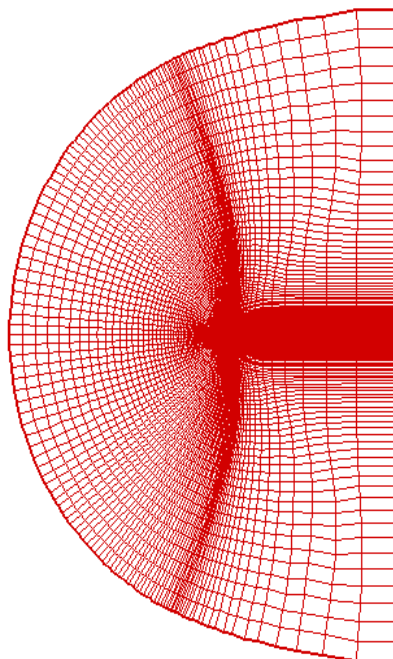
### شکل ها و نمودارها



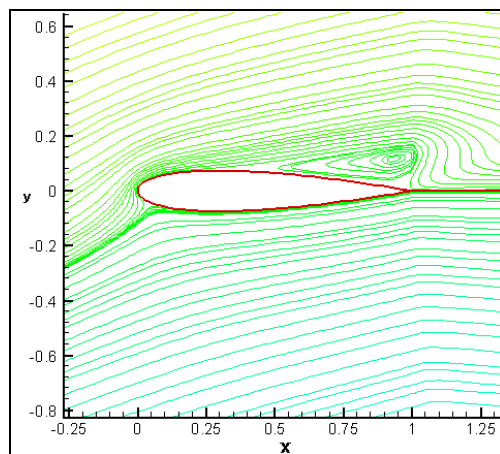
شکل ۱- عملگر الکترو مغناطیس برای ایجاد نیروی لورنتز موازی با دیوار



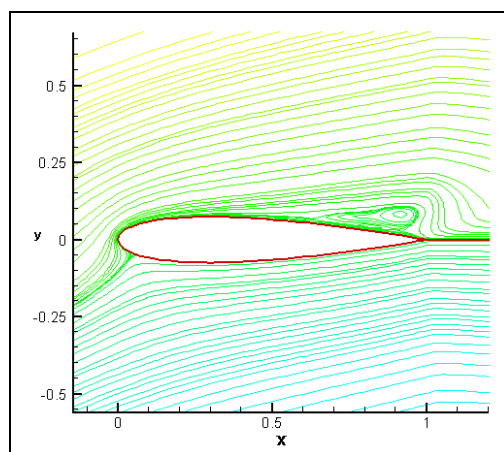
شکل ۲- نمایشی از محل اعمال نیروی لورنتز توسط عملگر الکترو مغناطیس



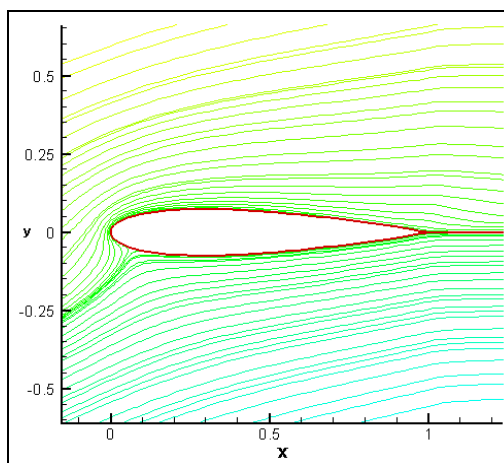
شکل ۳- شبکه سازمان یافته نوع C با تعداد گرید ۱۰۱×۱۴۱



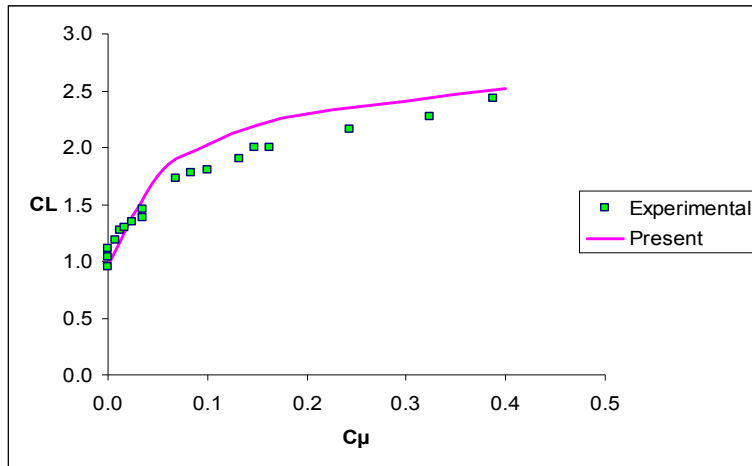
شکل ۴- کانتور خطوط جریان برای زاویه حمله ۱۸ و  $C_{\mu} = 0.18$



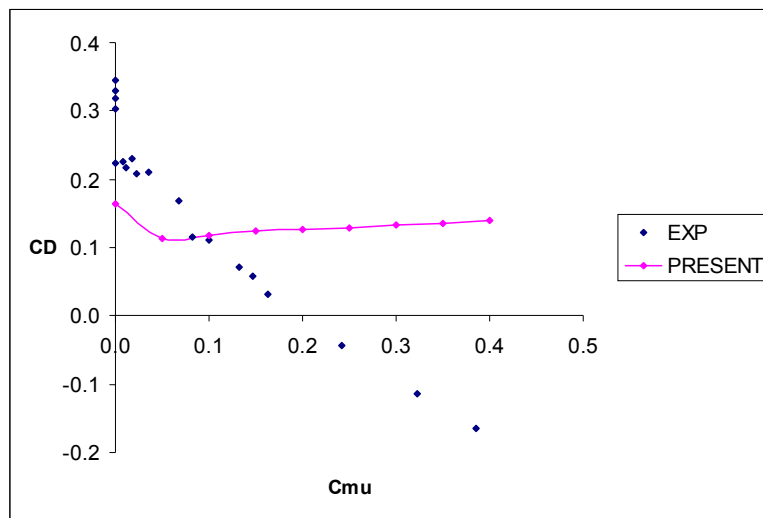
شکل ۵- کانتور خطوط جریان برای زاویه حمله ۱۸ درجه و  $C_{\mu} = 0.12$



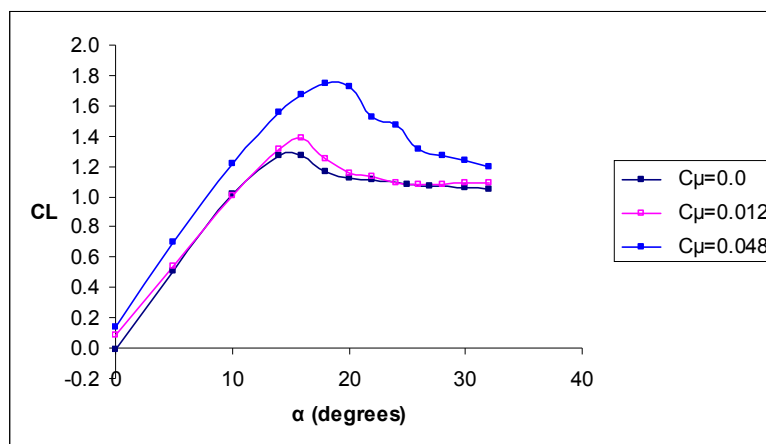
شکل ۶- کانتور خطوط جریان برای زاویه حمله ۱۸ درجه و  $C_{\mu} = 0.48$



شکل ۷- منحنی تغییرات ضریب لیفت بر حسب ضریب مومنتم و مقایسه با نتایج تجربی [۸] برای زاویه حمله ۱۸ درجه

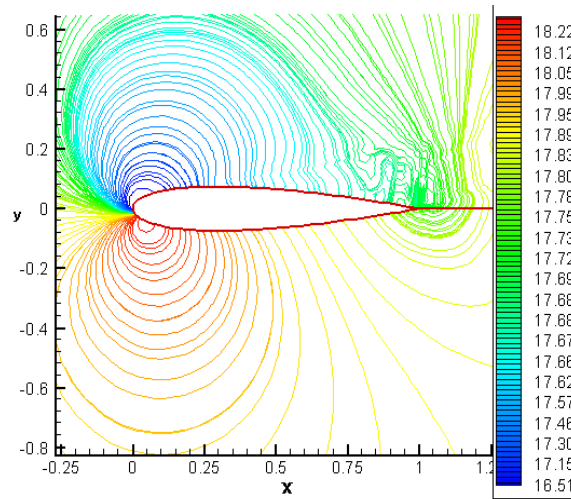


شکل ۸- منحنی تغییرات ضریب درگ بر حسب ضریب مومنتم و مقایسه با نتایج تجربی [۸] برای زاویه حمله ۱۸ درجه

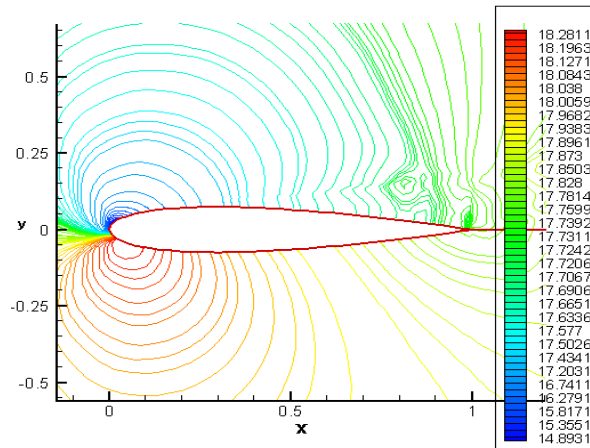


شکل ۹- تاثیر افزایش ضریب مومنتم بر ضریب لیفت برای زوایای حمله مختلف

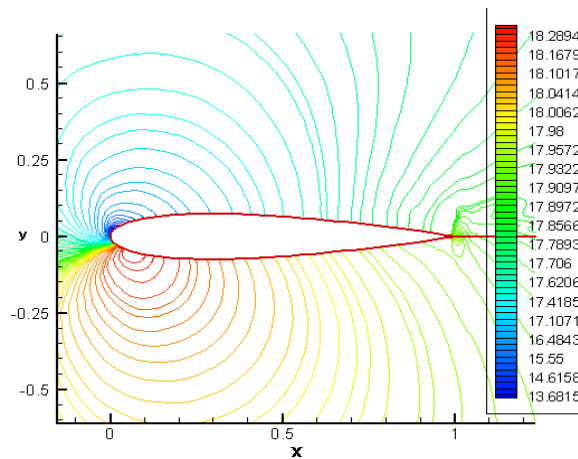




شکل ۱۰- کانتورهای فشار برای زاویه حمله ۱۸ درجه و حالت  $C_{\mu} = 0/0$



شکل ۱۱- کانتورهای فشار برای زاویه حمله ۱۸ درجه و حالت  $C_{\mu} = 0/0.12$



شکل ۱۲- کانتورهای فشار برای زاویه حمله ۱۸ درجه و حالت  $C_{\mu} = 0/0.48$



## مراجع

- 1- Gad-el-Hak, M., Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management, Cambridge University Press, 2000.
- 2- A. K. Gailitis and O. A. Lielausis, "On the possibility of drag reduction of a flat plate in an electrolyte," Appl. Magneto hydrodyn. Trudy Inst. Fiziky AN Latvia SSR 12, pp.143, 1961.
- 3- A. B. Tsinober and A. G. Shtern, "Possibility of increasing the flow stability in a boundary layer by means of crossed electric and magnetic fields," Magneto hydrodynamics 3, pp.152,1967.
- 4- C. C. Lin, The Theory of Hydrodynamic Stability, Cambridge University Press, Cambridge, 1966.
- 5- D. M. Nosenchuck and G. L. Brown, "Discrete spatial control of wall shear stress in a turbulent boundary layer," in Near-Wall Turbulent Flows, edited by R. M. C. So, C. G. Speziale, and B. E. Launder, Elsevier Science Publishers B.V., New York, pp. 689-698, 1993.
- 6- C. Henoeh and J. Stace, "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. Berger, John Kim, Changhoon Lee, and Junwoo Lim, "Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force," PHYSICS OF FLUIDS, Volume 12, Number 3, March 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, 2000, pp. 36-40.
- 10- S. A. Akbari, A. Sedaghat and A. R. Azimian, "Computational Flow Separation Control using Electromagnetic fields," 14th Annual (International) Mechanical Engineering Conference Isfhan University of Technology, Isfhan - May 2006.
- 11- A. Sedaghat, A. R. Azimian and S. A. Akbari, "Computational Stall Prevention Using Electromagnetic Fields," European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CDF, Egmond Ann Zee, Netherland, February 2006.
- 12- Yee, H.C., "Implicit Total Variation Diminishing (TVD) Schemes for Steady-State Calculations," J. Comp. Phys., 57, 1985, pp. 327-360.
- ۱۳- نعمت الله فولادی، محمد رضا جهان نما، فضل الله محقق، کنترل جدایش جریان روی سطح هیدروفیل با استفاده از نیرو های الکترومغناطیس، سیزدهمین کنفرانس (بین المللی) سالانه مهندسی مکانیک، اردیبهشت ۱۳۸۴.