

حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر میدان مغناطیسی در جریان روی هندسه نوک تیز در ماخ و ارتفاعات بالا و اثر آن بر ضرایب دراگ و لیفت

سید میرالله حسینی متی کلایی^۱، محمد حاتمی^{۲*}، عزیز وظیفه شناس^۳

(^۱) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قائمشهر، قائمشهر، ایران

(^۲) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(^۳) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسفراین، اسفراین، ایران

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

چکیده

در این مقاله به حل عددی اثر جریان مگنتو هیدرودینامیک بر روی دو هندسه آیرودینامیکی، بصورت دو بعدی و سه بعدی پرداخته شده است. نتایج برای دو هندسه دو و سه بعدی که تا حدودی سعی شده است شبیه به بال موشک باشد، در ارتفاعات بالا که فشار زیاد و دما کم می باشد و همچنین ماخ های ۶ و ۸ در ۹ زاویه حمله مختلف، در دو حالت بدون مگنت و با مگنت ضرایب لیفت و دراگ بدست آمده است. در پایان مشاهده شد که با اضافه کردن مگنت به مسئله میزان ضریب لیفت افزایش پیدا می کند که بیشترین درصد افزایش ضریب لیفت برای هندسه سه بعدی و شرایط ماخ ۸ و ارتفاع ۵۰۰۰۰ متر رخ داده است که ۷۷.۵٪ می باشد. همچنین با مقایسه دو هندسه سه بعدی و دو بعدی مشاهده شد که زاویه استال در هندسه دو بعدی در حالت ارتفاع ۹۰۰۰ و ماخ ۶ رخ نداده اما در هندسه سه بعدی و همین شرایط حل زاویه استال برای حالت بدون MHD اتفاق افتاده، که علت این امر را می توان در خط جریانی بودن هندسه دو بعدی دانست. البته در ادامه مشاهده شد که با اضافه کردن مگنت در هندسه سه بعدی و شرایط حل مذکور این زاویه به تاخیر افتاده است.

واژه‌های کلیدی: مگنتو هیدرودینامیک، ضریب دراگ، ضریب لیفت، ماخ، زاویه استال.

۱- مقدمه

مطالعه برهم کنش میدان الکتریکی و مغناطیسی با جریان سیال رسانا منگتو هیدرودینامیک یا MHD نامیده می‌شود. تحت شرایط معینی می‌توان یک گاز را به سیال هادی الکتریسیته تبدیل نمود. حال اگر یک منبع قدرت خارجی برای تولید میدان الکتریکی به کار گرفته شود، بر هم کنش جریان الکتریکی عمود بر جریان گاز و یک میدان مغناطیسی منجر به نیروی شتاب دهنده‌ای در جهت حرکت جریان گاز می‌شود. از این نیروی شتاب دهنده می‌توان برای کاهش اثرات منفی گرادیان فشار معکوس و در نتیجه کاهش ناحیه جدایش جریان و کاهش ضریب پسا بر روی سازه‌های هوافضایی مثل ایرفویل استفاده کرد. همچنین می‌توان از آن در سیستم پیشرانش موشک برای دستیابی به سرعت زیاد گاز خروجی استفاده نمود [۱] برای این منظور ابتدا بایستی گاز را هادی الکتریسیته کرد. یک روش ساده افزایش دمای گاز است. در دمای بالا اتم‌ها به یون‌ها با بار مثبت و الکترون‌ها تقسیم می‌شوند. گاز حاصل پلاسما نام دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که واژه پلاسما به گاز یوتیزه شده‌ای اطلاق می‌شود که همه یا بخش قابل توجهی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و به یون‌های مثبت تبدیل شده باشند [۲]. برای تولید گاز هادی الکتریسیته می‌توان از درصد کمی از مواد با انرژی یونش پایین به عنوان بذر استفاده کرد [۱]. البته با توجه به شرایط جریان در ماخ‌های بالا، دسترسی به دمای بالا و در نتیجه یونیزه شدن سیال عبوری از روی ایرفویل دور از تصور نیست. عملکرد یک سیستم ام‌اچ‌دی چه برای تولید قدرت و چه برای شتاب دادن به یک جریان گاز، بستگی به توانایی در تبدیل یک گاز خنثی به گاز با هدایت الکتریکی قابل ملاحظه دارد. بنابراین بافتن موادی که در ماخ‌های بالا دارای یون زایی بالاتر باشند، مورد توجه است. عامل دیگر نیز

جنسی بالک با قابلیت رسانایی متفاوت بوده که بایستی مورد بررسی قرار گیرد. تحقیقات زیادی در زمینه کاربرد منگتو هیدرو دینامیک در سازه‌های هوافضایی صورت گرفته است. اما تمرکز تحقیقات انجام شده بر روی تیروی پیشرانش موتور می‌باشد و لزوم بررسی بیشتر جریان هیدرو دینامیک و اثر آن بر روی جریان خارجی روی سطوح آیرودینامیکی مانند ایرفویل احساس می‌شود.

در سال ۱۹۰۴، پرانت مفهوم لایه مرزی را بیان کرد و به این وسیله ارتباط مهمی میان جریان سیال ایده‌آل و جریان سیال واقعی به وجود آمد. برای سیالاتی که ویسکوزیته نسبتاً کمی دارند، اثر اصطکاک داخلی در سیال تنها در ناحیه باریکی از محیط که مرز سیال را تشکیل می‌دهد، قابل توجه است و لذا خارج از این ناحیه باریک در نزدیکی مرزهای جامد، باید جریان را ایده‌آل در نظر گرفت [۳]. ژائو و همکاران [۴] بصورت عددی پدیده الکترو هیدرو دینامیک را در یک کانال مسطح بررسی نمودند. الگوریتم حل عددی آن‌ها ترکیبی از روش‌های المان محدود، روش مشخصه‌ها، و حجم محدود بوده است. نتایج آن‌ها شبیه‌سازی الگوی جریان تحت تاثیر پدیده الکترو هیدرو دینامیک و پارامترهای موثر بر این پدیده را ارائه می‌دهد. آن‌ها دریافتند با افزایش عدد رینولدز، تاثیر پدیده الکترو هیدرو دینامیک بر جریان سیال کاهش می‌باشد. علاوه بر این بزرگی گردابه‌ها در عدد رینولدز ثابت به ولتاژ اعمال شده بستگی دارد و در سرعت‌های پایین، سرعت جریان تاثیری بر پارامترهای الکتریکی نمی‌گذارد، اما در سرعت‌های بالا بطور موثری بر میدان الکتریکی تاثیر گذار می‌باشد.

تادا و همکاران [۵] با استفاده از الکترو داینامیک سیمی به موازات جریان اصلی، به انجام یکسری آزمایشات به منظور تاثیر میدان الکتریکی بر جریان‌های داخل کانال پرداختند. در بررسی آن‌ها الکترو داینامیک سیمی به فاصله مساوی از یکدیگر قرار گرفته‌اند و

محرك وابسته به ولتاژ اعمالی و فاصله نسبی بین محرك و خط جدایش است.

اسماعیل زاده و آقازینالی [۹] جریان حول استوانه تحت تاثیر یک محرك الکترو هیدرودینامیکی میله صفحه‌های چسبیده به سطح استوانه را با استفاده از روش اجزاء محدود به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که با اعمال میدان الکتریکی، جریان سیال در مجاورت نیمه جلویی استوانه شتاب می‌گیرد و در نتیجه با افزایش اختلاف فشار سطوح جلویی و عقبی استوانه ضریب بازدارندگی افزایش می‌یابد. همچنین آنها نشان دادند که حجم ناحیه دنباله در پشت استوانه و ضریب بازدارندگی با افزایش سرعت ورودی به ازای یک اختلاف ولتاژ اعمالی یکسان کاهش می‌یابند.

تطهیری و اسماعیل زاده [۱۰] اثر پدیده EHD بر کنترل لایه مرزی ورقهای روی استوانه به کمک دو الکتروود سیمی و دو الکتروود نواری چسبیده به سطح استوانه را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها بیان کننده این مطلب است که ضریب بازدارندگی افزایش یافته و در تمامی حالت‌ها افزایش سرعت در لایه مرزی مشاهده می‌شود که حاکی از افزایش مومنتم ذرات سیال در اثر اعمال میدان الکتریکی است. همچنین این تأثیرات در اعداد رینولدز پایین به نسبت بیشتر است. علاوه بر این آنها دریافتند که ضریب بازدارندگی تابع هندسه مسئله، ولتاژ اعمالی و رژیم جریان می‌باشد که در هندسه مورد نظر آنها ضریب بازدارندگی افزایش یافته است.

مطالعات زیادی در خصوص جریان هوا روی اجسام در کاربرد های مختلف از جمله انرژی باد و هوافضا انجام شده است. نان و همکاران [۱۱] به مدلسازی جریان هوا روی ایرفویل توربین بادی پرداختند. ژو و همکاران [۱۲] به مدلسازی جریان توربولانسی یک ایرفویل به کمک شبکه عصبی در رینولدزهای بالا پرداختند. ژو و همکاران [۱۳] به مدلسازی جریان

بوسیله منبع مولد ولتاژ بالای مثبت تغذیه می‌شدند. نتایج آنها افزایش آهنگ نرخ انتقال حرارت جابجایی بویژه در محدوده جریان های آرام، در اثر ترکیب جریان‌های ثانویه ناشی از میدان های الکتریکی و جریان اولیه را نشان داده است. هیونو چون [۶] بصورت تجربی تاثیر جریان سیال بر گردابه‌های پشت سیلندر در داخل یک کانال را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در کار تجربی خود الکتروود تزریق کننده را در زوایای مختلف ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ و فواصل ۱، ۱.۵، ۳ سانتی متر از سطح سیلندر قرار دادند. نتایج آنها با آشکار سازی خطوط جریان نشان داد جریان یونی تاثیر چشمگیری بر ساختار گردابه ای پشت سیلندر می‌گذارد و نیروی بازدارندگی فشاری تحت تاثیر بار یونی 4 به طور قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد.

لگر و همکاران [۷] بر روی جریان هوا در امتداد یک DC نیز به بررسی تجربی تأثیر تخلیه کرونای صفحه تخت شیبدار پرداختند. آشکار سازی میدان جریان و نیز تعیین توزیع نشان داد که بدون اعمال میدان الکتریکی، PIV سرعت با استفاده از فنآوری جریان در لبه جلویی صفحه از آن جدا شده و دنباله های قابل توجهی در بالای صفحه شکل می‌گیرد. اما با اعمال میدان الکتریکی، خطوط جریان به سمت صفحه منحرف می‌شود که با توجه به عدد رینولدز جریان و شیب صفحه، به برخورد یا عدم برخورد جریان با صفحه منجر شده و همزمان از میزان گردابه ها کاسته می‌شود. همچنین آنها دریافتند که تأثیر تخلیه یونها بر مشخصه های جریان در اعداد رینولدز پایین در قالب کاهش دنباله های جریان و کاهش نیروی بازدارندگی، بیشتر بوده و با افزایش سرعت جریان، تاثیر تخلیه کمتر می‌شود.

روبرتو گویلمو [۸] به صورت تجربی جریان روی یک بالواره متقارن در رینولدز پایین را تحت تاثیر محرك الکترو هیدرودینامیکی بررسی نمودند. نتایج آنها حاکی از آن بود که در رینولدز های پایین تاثیر

سینتیک توربولانس (k) و میزان پراکندگی آن (ε) از معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3)$$

در این معادلات، G_k تولید انرژی سینتیک توربولانس، ناشی از گرادیان سرعت است G_b تولید انرژی سینتیکی توربولانس، ناشی از نیروهای شناوری، Y_m تاثیر نوسانات انبساطی در جریان‌های تراکم پذیر بر روی میزان پراکندگی هستند. $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ ثابت‌ها بوده، $\sigma_\varepsilon, \sigma_k$ اعداد پراوتل مغشوش برای ε, k می‌باشند. s_ε, s_k ترم‌های تعریف شده توسط کاربر می‌باشند.

مدل سازی لزجت مغشوش در مدل استاندارد $k-\varepsilon$: لزجت مغشوش یا لزجت ادی μ_t از ترکیب ε, k به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

که C_μ عددی ثابت است.

۲-۱- توری مدل MHD

تأثیرات متقابل میدان جریان سیال و میدان مغناطیسی را می‌توان بر مبنای دو عامل بنیادی بررسی کرد: القای جریان الکتریسته ناشی از حرکت ماده رسانا در میدان مغناطیسی و تاثیر نیروی لورنتس در نتیجه برهم کنش جریان الکتریسته و میدان مغناطیسی. به طور کلی جریان الکتریکی القایی و نیروی لورنتس، تمایل به از بین بردن عامل ایجاد کننده ی خود دارند. بنابراین نیروی لورنتس ناشی از حرکات ماده رسانا در میدان

جت هوا روی ایرفویل در یک جسم آسان برا پرداختند. همچنین لی و همکاران [۱۴] به مدلسازی LES جریان توربولانسی پیچیده روی ایرفویل یخ زده اشاره کردند و جدایش جریان را بررسی کردند. این روش همچنین توسط آلبرس و اشرودر [۱۵] جهت مدلسازی، افزایش لیفت و کاهش دراگ در روی ایرفویل‌های متحرک به کار گرفته شد. هولمن و فورست [۱۶] نیز از روش حجم محدود برای مدلسازی جریان لمینار و توربولانت روی ایرفویل بهره گرفتند. هدف از پروژه حاضر بررسی جریان سیال همراه با میدان مغناطیسی بر روی سطوح آیرودینامیکی، به منظور کاهش ضریب پسا و افزایش ضریب برا و همچنین کاهش گردابه های اتلاقی و به تاخیر انداختن زاویه استال می باشد. معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم همراه با عباراتی است که دربرگیرنده آثار میدانهای مغناطیسی می باشد که به کمک روش حجم محدود حل شده اند. معادلات ماکسول و قانون اهم هم بر مساله حاکم می باشد که از ترکیب آنها یک معادله انتقال برای محاسبه میدان مغناطیسی به دست می آید. در انتها اثر ارتفاع و ماخ و میدان مغناطیسی بر نیروهای دراگ و لیفت بررسی شده است.

۲-۲ مدلسازی و معادلات حاکم

جریان توربولانت تراکم پذیر به شکل برداری با در نظر گرفتن معادلات ناویر استوکس و انتقال به شکل زیر است [۱۶]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F_j(W)}{\partial x_j} = \frac{\partial R_j(W)}{\partial x_j} + Q(W) \quad (1)$$

که در آن $W = (\rho, \rho \bar{u}, \rho E, \rho k, \rho \omega)^T$ بردار متغیرهای میانگین، F شار لزجت مربوطه، R شار ویسکوز مربوطه و بردار Q ترم منبع را نشان می‌دهد. معادلات حاکم در مدل استاندارد $k-\varepsilon$ انرژی

دانستن چگالی جریان \vec{J} ناشی از القا، حیاتی است. به طور کلی دو طریق برای ارزیابی چگالی جریان وجود دارد. یکی از طریق حل معادله القای مغناطیسی و دیگری حل معادله پتانسیل الکتریکی.

۲-۱-۱- روش القای مغناطیسی

در این روش برای اندازه گیری \vec{J} (چگالی جریان) معادله القای مغناطیسی، از قانون اهم^۴ و معادلات ماکسول به دست می آید. این معادله تداخل جریان سیال و میدان مغناطیسی را میسر می سازد.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (11)$$

که σ هدایت الکتریکی ماده است. برای سیال با سرعت \vec{u} در میدان مغناطیسی \vec{B} قانون اهم به شکل زیر نوشته می شود:

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (12)$$

از قانون اهم و معادلات ماکسول معادله القا به شکل زیر حاصل می گردد.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{u} \quad (13)$$

با حل میدان مغناطیسی \vec{B} چگالی جریان \vec{J} را می توان از رابطه آمپر به دست آورد.

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \quad (14)$$

به طور کلی، میدان مغناطیسی \vec{B} در یک مسئله MHD را می توان به دو میدان خارجی \vec{B}_0 و یک میدان القایی \vec{b} ناشی از حرکت سیال تجزیه کرد. در این صورت تنها میدان القایی \vec{b} نیاز به حل دارد. در این مطالعه ضرایب دراگ و لیفت از روابط زیر محاسبه می شوند [۱۵].

مغناطیسی در جهتی است که مانع آن حرکات گردد. القای الکتریسیته همچنین می تواند در حضور میدان مغناطیسی متغیر با زمان نیز، اتفاق بیافتد. به هر حال نتیجه این امر بر هم زدن حرکت سیال توسط نیروی لورنتس است. میدان های الکترومغناطیسی توسط معادلات ماکسول^۲ توصیف می گردند.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (8)$$

که در این معادلات، \vec{B} شدت میدان مغناطیسی و واحد آن تسلا، \vec{E} میدان الکتریکی و واحد آن ولت بر متر (V/m) است. \vec{D}, \vec{H} میدان های القایی مغناطیسی و الکتریکی بوده، q و \vec{J} به ترتیب چگالی بار و بردار چگالی جریان و واحدهای آن (C/m^3) و (A/m^2) می باشند. \vec{D}, \vec{H} توسط معادلات زیر تعریف می شوند.

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \quad (9)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (10)$$

که ϵ, μ به ترتیب قابلیت نفوذ مغناطیسی و ثابت دی الکتریک^۳ می باشند. برای موادی که به اندازه ی کافی هادی الکتریسیته باشند، نظیر فلزات مایع، از چگالی بار الکتریکی q و جریان جابجایی معمولاً صرف نظر می گردد. در مطالعه تقابل میان جریان سیال و میدان الکترومغناطیسی،

2- Maxwells equations

3- Magnetic permeability

4- Ohms law

رسم شده را مورد بررسی قرار داد تا این شبکه توانایی این را داشته باشد که داده‌ها را با سرعت بالا و همچنین با دقت کافی انتقال دهد تا نتایج قابل اطمینانی بدست آید. برای اینکه بتوان از حداکثر توان محاسباتی سیستم استفاده کرد و همچنین زمان اضافه‌ای صرف محاسبه نشود، باید با استفاده از مطالعه شبکه به یک شبکه معقول رسید. بدین منظور ابتدا از شبکه با تراکم پایین استفاده می‌شود. یک یا چند کمیت انتگرالی و یا توزیع یافته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در هر مرحله تراکم افزایش می‌یابد تا جایی که پارامترهای مورد بررسی ما تغییری نسبت به حالت قبل نکنند. با ریز کردن تعداد تقسیمات برای دیواره‌های جسم و دیواره‌های مربع در نظر گرفته شده حول جسم، طبق شکل ۲ و جدول ۱، شبکه بندی آغاز می‌شود.

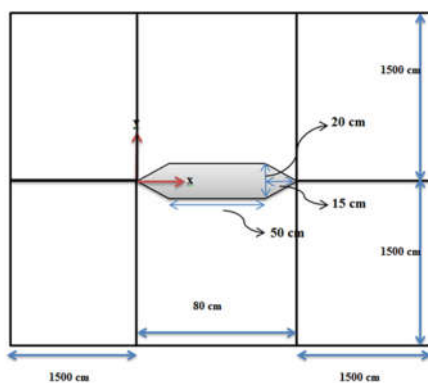
قابل ذکر است که در شکل ۱ برای قسمت ۸۰ cm شبکه بندی شامل دو قسمت می‌باشد. قسمت اول مربوط به قسمت خمیده جلو و عقب جسم نوک تیز و قسمت دوم مربوط به دیواره افقی بالا و پایین جسم می‌باشد. شرایط حل نیز مطابق جدول ۲ می‌باشد.

$$C_D = \frac{2D}{\rho_{\infty} u_{\infty}^2 A_{ref}} \quad (15)$$

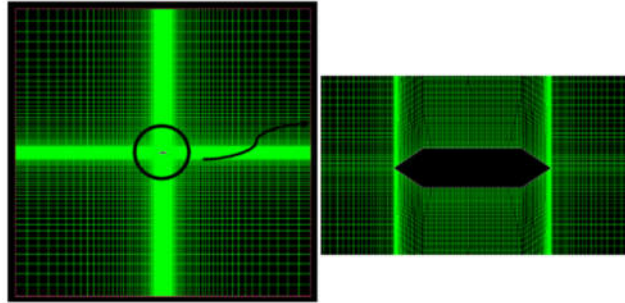
$$C_L = \frac{2L}{\rho_{\infty} u_{\infty}^2 A_{ref}} \quad (16)$$

۳- تعریف مسئله، روش حل و استقلال از شبکه

در پژوهش حاضر از روش القای مغناطیسی استفاده می‌شود به این صورت که نیروی لورنتس با استفاده از ماژول فلونتت به شکل یک ترم منبع به معادلات مومنوم سیال افزوده شده است. معادلات ناشی از جریان حول دو هندسه (دو بعدی و سه بعدی) در ارتفاعات و ماخ بالا بررسی شده است. جریان سیال تراکم ناپذیر و لزج فرض شده است و برای حل معادلات توربولانس از مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است. روش حل عددی در فلونتت بر مبنای روش حجم محدود است و مشخصات سیستم مورد استفاده مطابق شکل ۱ می‌باشد. قابل ذکر است که میزان زمان دیتاگیری برای هندسه دو بعدی تقریباً ۲۵ دقیقه و برای هندسه سه بعدی ۹ ساعت می‌باشد. برای رسیدن به نتایج قابل اطمینان باید شبکه‌ای



شکل ۱. طریقه قسمت بندی برای ایجاد شبکه مش.



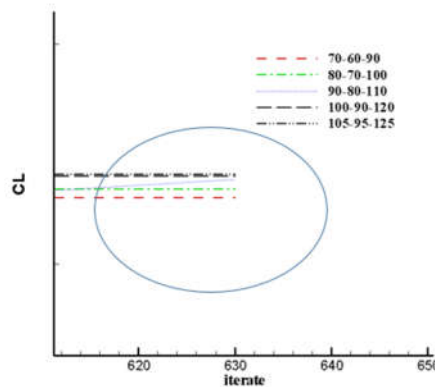
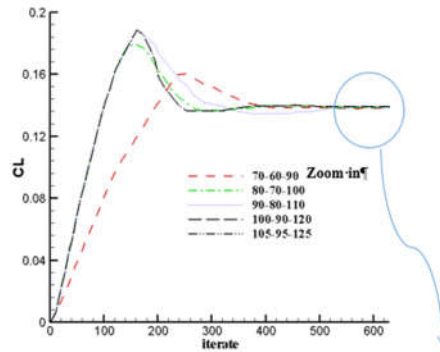
شکل ۲. هندسه دو بعدی شبکه بندی شده در گمبیت.

جدول ۱. طریقه نامگذاری برای خطوط هندسه رسم شده.

1500 cm	L1
قسمت خمیده جلو و عقب جسم نوک تیز	L2
به دیواره افقی بالا و پایین جسم (50 cm)	L3

جدول ۲. شرایط حل برای مطالعه شبکه در هندسه ۲ بعدی.

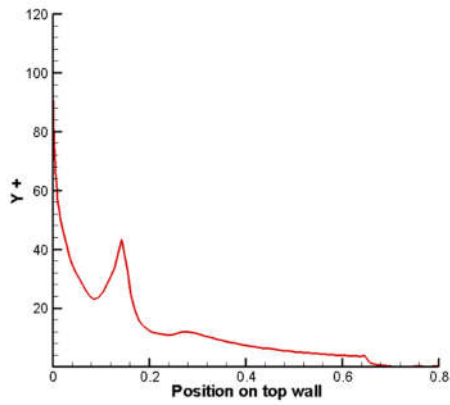
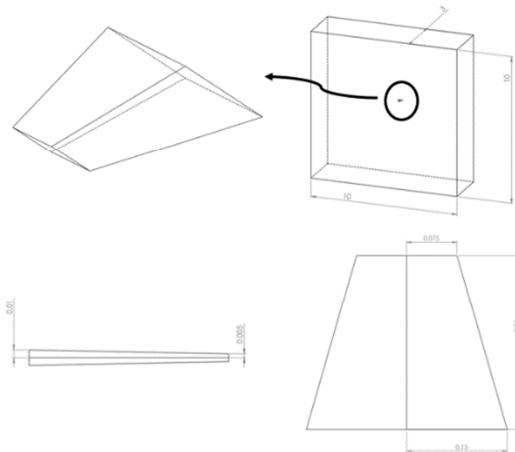
$\alpha(\text{deg})$	ماخ	ارتفاع	$B_0(T)$
۲۰	6	9000 m	۰



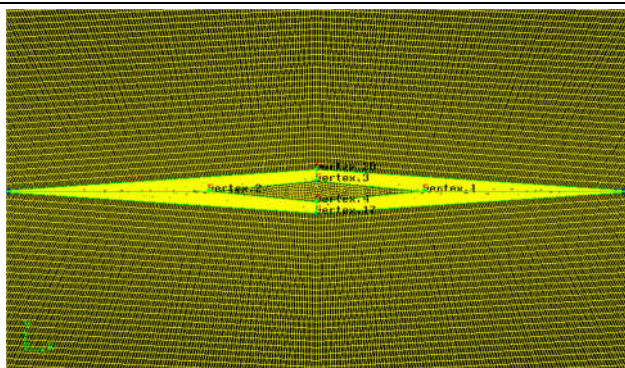
شکل ۳. نمودار استقلال شبکه برای ۵ شبکه بندی مختلف 2d.

جدول ۳. مقادیر همگرا شده ضریب لیفت برای ۵ شبکه بندی متفاوت 2d.

نوع شبکه بندی	ضریب لیفت C_L
۷۰ - ۶۰ - ۹۰	۰.۱۳۸۴۲
۸۰ - ۷۰ - ۱۰۰	۰.۱۳۸۷۴
۹۰ - ۸۰ - ۱۱۰	۰.۱۳۹۱۱
۱۰۰ - ۹۰ - ۱۲۰	۰.۱۳۹۲۲
۱۰۵ - ۹۵ - ۱۲۵	۰.۱۳۹۲۶

شکل ۴. نمودار y^+ برای دیواره بالا برای شبکه بندی ۱۰۰-۹۰-۱۲۰.

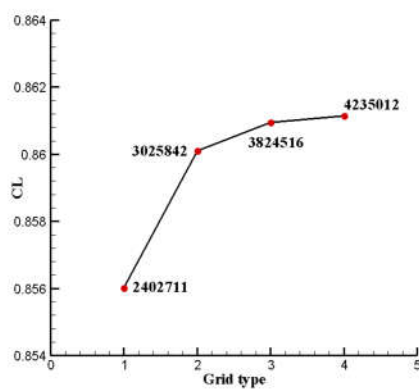
شکل ۵. شماتیک هندسه سه بعدی.



شکل ۶. شبکه بندی هندسه سه بعدی در نرم افزار گمبیت.

جدول ۴. شرایط حل برای مطالعه شبکه در هندسه ۳ بعدی.

$\alpha(\text{deg})$	ماخ	ارتفاع	$B_o(T)$
۲۵	6	9000 m	0.7



شکل ۷. نمودار استقلال شبکه برای ۴ شبکه بندی مختلف 3d.

جدول ۵. مقادیر همگرا شده ضریب لیفت برای ۴ شبکه بندی متفاوت 3d.

نوع شبکه بندی	ضریب لیفت C_L
۱	۰.۸۵۶۰۲
۲	۰.۸۶۰۱۱
۳	۰.۸۶۰۹۵
۴	۰.۸۶۱۱۴

اینکه این محاسبات باید برای موارد مختلف انجام پذیرد بهتر است برای صرفه جویی در زمان از شبکه با تعداد سلول ۳۸۲۴۵۱۶ استفاده شود. شرایط حل مطابق جدول ۴ می باشد. شکل ۵ و ۶ شماتیک هندسه سه بعدی و شبکه بندی شده آن در نرم افزار گمبیت نشان داده شده است. شکل ۷ نیز صحت شبکه انتخابی را از نظر استقلال از شبکه نشان می دهد.

۹۰۰۰ متر برابر است با ۲۹۵۲۷.۵۶ فوت بنابراین مقدار فشار و دمای هوا در این ارتفاع با استفاده از مراجع و با میان یابی بین ۲۸۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ فوت به ترتیب برابر است با ۳۰۷۹۷.۸۴۴ پاسکال و ۲۲۹.۷۴۷ درجه کلوین. مقدار B در ماژول فلوئنت در راستای Y و مقدار منفی در نظر گرفته می شود. در این قسمت به بررسی صحت حل هندسه مورد مطالعه پرداخته می شود. برای این امر، در این پژوهش از مقاله ریخووسکی [۱۷] استفاده می شود. هندسه مورد بررسی در این مقاله در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود هندسه این پژوهش نوک تیز بوده و از شرط تقارن برای کل هندسه استفاده شده است، به طوری که نصف هندسه در نرم افزار اوپن فوم تحت شرایط حل مطابق با جدول ۶ شبیه سازی شده است.

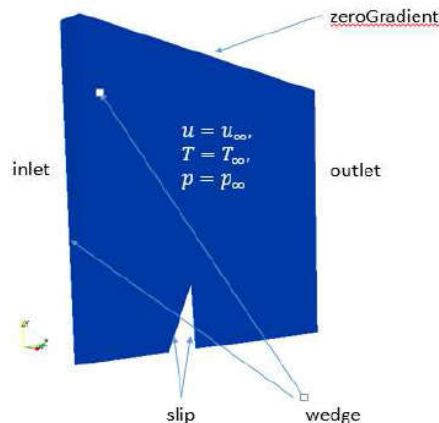
با توجه به جدول بالا تمامی شبکه بندی‌های صورت گرفته به ترتیب L1-L2-L3 می باشد. در شکل ۳ ضریب لیفت برای زاویه ۲۰ درجه برای حالت بدون MHD نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود برای دو حالت آخر نتایج کاملاً نزدیک به هم می باشند.

در جدول ۳ مقادیر همگرا شده ضریب لیفت برای هر شبکه بندی نشان داده شده است. همانطور که از شکل و نمودار مشاهده می شود میزان تغییرات در دو شبکه آخر به میزان بسیار کمی با هم تفاوت دارند. پس برای کاهش زمان دیتاگیری از شبکه بندی ۱۰۰-۹۰-۱۲۰ استفاده خواهد شد.

در شکل ۴ نمودار γ^+ برای شبکه بندی ۱۰۰-۹۰-۱۲۰ نشان داده شده است. که نشان می دهد شبکه انتخابی برای این هندسه مناسب است.

۴-۳- استقلال شبکه برای هندسه سه بعدی

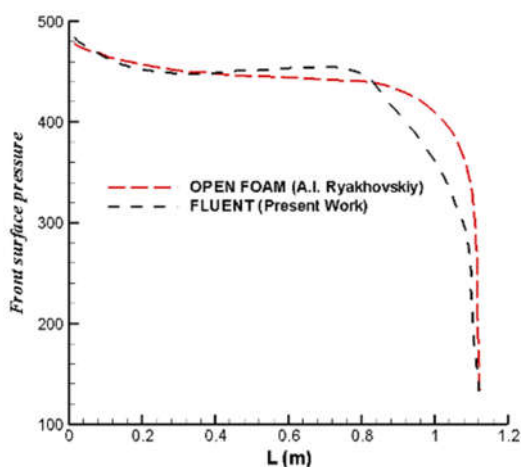
برای هندسه سه بعدی نیز مطابق شکل ۵ نتایج همگرا شده ضریب لیفت حاصل شد. شبکه بندی برای ۴ نوع تعداد المان بررسی شد. همانطور که مشاهده می شود نتایج دو شبکه آخر در حد بسیار پایینی با یکدیگر اختلاف داشتند اما از نظر زمان محاسباتی ۶ ساعت با یکدیگر اختلاف دارند. با صرف چنین زمانی و تغییر کم دقت و تعداد زیاد و



شکل ۸. شماتیک هندسه مورد مطالعه ریخووسکی و همکاران [۱۷].

جدول ۶. شرایط حل شبیه سازی ریاخووسکی و همکاران [۱۷] در نرم افزار اپون فوم.

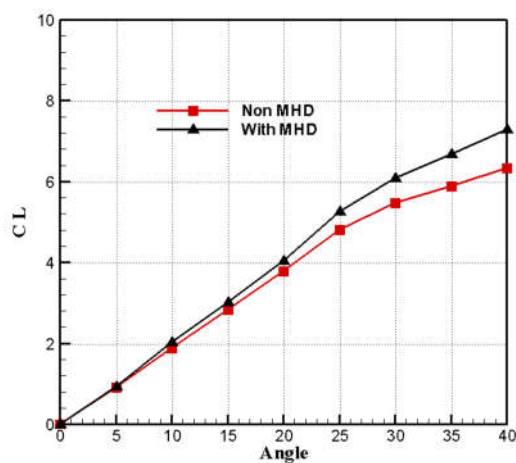
گاز	هوا
فشار p_{∞} (pa)	۳۰۰۰
دما T_{∞} (کلوین)	۲۱۶.۵
ماخ	۳.۳۷



شکل ۹. بررسی صحت نتایج فشار در طول هندسه، با مقاله ریاخووسکی و همکاران [۱۷].

جدول ۷. شرایط حل برای هندسه دو بعدی.

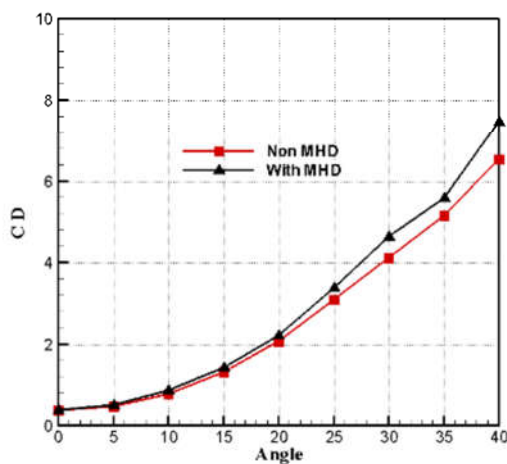
$\alpha(\text{deg})$	ماخ	ارتفاع	$B_o(T)$
0-40	6	9000 m	0-0.7



شکل ۱۰. اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب لیفت در هندسه دو بعدی.

جدول ۸. مقادیر عددی اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب لیفت.

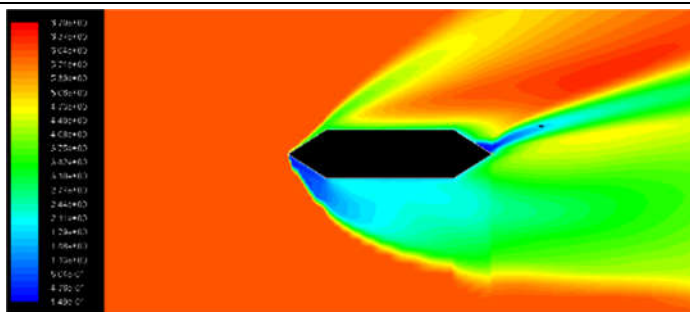
With MHD		NON MHD	
0	2.663×10^{-8}	0	1.232×10^{-7}
5	0.945	5	0.920
10	2.036	10	1.883
15	3.015	15	2.840
20	4.044	20	3.792
25	5.267	25	4.821
30	6.085	30	5.471
35	6.688	35	5.885
40	7.294	40	6.341



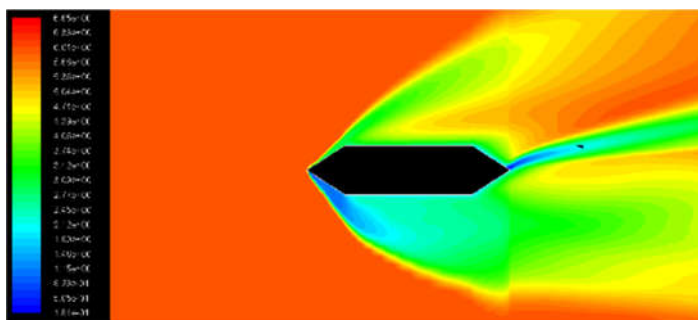
شکل ۱۱. اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب دراگ در هندسه دو بعدی.

جدول ۹. مقادیر عددی اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب دراگ.

With MHD		NON MHD	
0	0.389	0	0.378
5	0.514	5	0.473
10	0.8578	10	0.783
15	1.415	15	1.314
20	2.215	20	2.064
25	3.382	25	3.084
30	4.638	30	4.117
35	5.581	35	5.148
40	7.473	40	6.545



شکل ۱۲. کانتور ماخ برای زاویه حمله ۱۰ درجه بدون MHD برای هندسه دو بعدی.



شکل ۱۳. کانتور ماخ برای زاویه حمله ۱۰ درجه با MHD برای هندسه دو بعدی.

نمی شود. اما با افزایش زاویه حمله و با اضافه کردن مگنت افزایش چشمگیری در ضرایب مشاهده شده است. همچنین همانطور که مشاهده می شود در هیچکدام از حالت های بدون مگنت و با مگنت زاویه استال رخ نمی دهد که این امر ناشی از شرایط حل در فشار و ماخ بالاست که در پژوهش های گذشته به آن اشاره ای نشده است. جدول ۸ و ۹ مقادیر عددی نمودار را در زوایای حمله مختلف نشان می دهد.

در شکل های ۱۲ و ۱۳ کانتور ماخ حول هندسه دوبعدی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در انتهای هندسه با جریان MHD جریان سکون کمتری به وجود آمده است.

۴-۵-۲- نتایج هندسه سه بعدی

در این قسمت به بررسی اثر جریان MHD و اثر زاویه حمله بر مقادیر ضریب دراگ و ضریب لیفت هندسه سه بعدی پرداخته می شود. در این هندسه دو شرایط حل بررسی می شود که در جداول ۱۰

در شکل ۹ فشار وارد شده از طرف سیال در طول هندسه مذکور، با نتایج روش حاضر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود نتایج شبیه سازی انجام شده با نرم افزار فلوئنت در کار حاضر با درصد قابل قبولی بانتهای کار ریاخووسکی و همکاران [۱۷] تطابق دارد.

۴- نتایج

۴-۱- نتایج هندسه دو بعدی

در این قسمت به بررسی اثر جریان MHD و اثر زاویه حمله بر مقادیر ضریب دراگ و ضریب لیفت هندسه دو بعدی پرداخته می شود. در جدول ۷ شرایط حل برای این هندسه نشان داده شده است. شکل ۱۰ و ۱۱ به ترتیب ضریب لیفت و ضریب دراگ را در ۹ زاویه حمله متفاوت در دو حالت با مگنت و بدون مگنت نشان داده است. همانطور که مشاهده می شود در زوایای حمله پایین تفاوت چندانی در مقادیر ضرایب لیفت و دراگ مشاهده

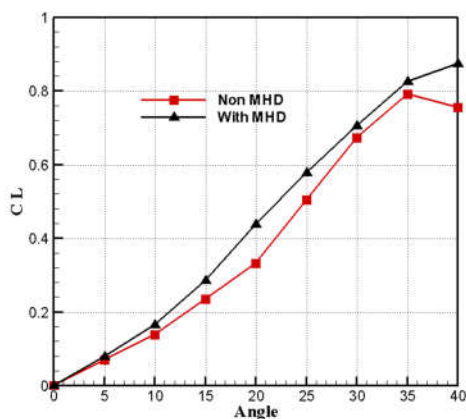
افتاده است. جداول ۱۱ و ۱۲ مقادیر عددی نمودارها را نشان می‌دهد.

همچنین برای هندسه سه بعدی، شرایط حل B مورد بررسی قرار داده شده است. شرایط حل برای این حالت در جدول ۱۳ مشاهده می‌شود. همانطور که از شکل ۴-۹ مشخص است با افزایش فشار و افزایش ماخ زاویه استال به تاخیر می‌افتد. همچنین در این ارتفاع و ماخ میزان افزایش ضریب لیفت با اضافه کردن مگنت، نسبت به حالت بدون مگنت افزایش بسیار بیشتری نسبت به شرایط حل A دارد. همچنین با مشاهده تغییرات ضریب دراک در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که سیر صعودی ضریب دراک با افزایش زاویه حمله نسبت به شرایط حل A کمتر می‌باشد.

۱۳ نشان داده شده است. برای حالت A یعنی فشار ۹۰۰۰ و ماخ ۶، شکل ۱۴ و ۱۵ به ترتیب ضریب لیفت و ضریب دراک را در ۹ زاویه حمله متفاوت در دو حالت با مگنت و بدون مگنت نشان داده است. همانطور که در این هندسه نیز مشاهده می‌شود در زوایای حمله پایین تفاوت چندانی در مقادیر ضرایب لیفت و دراک مشاهده نمی‌شود. اما با افزایش زاویه حمله و با اضافه کردن مگنت افزایش چشمگیری در ضرایب دیده شده است. اما تفاوت اصلی در این حالت نسبت به حالت دوبعدی این است که زاویه استال در هندسه دو بعدی مشاهده نشد، اما همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است زاویه استال برای حالت بدون MHD اتفاق افتاده، که با اضافه کردن مگنت در این هندسه و این شرایط حل این زاویه به تاخیر

جدول ۱۰. شرایط حل A برای هندسه سه بعدی.

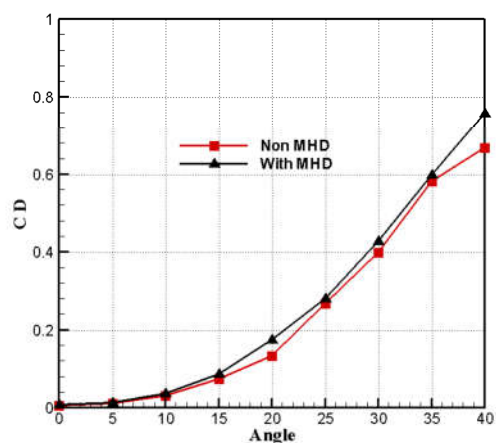
$\alpha(\text{deg})$	ماخ	ارتفاع	$B_o(T)$
0-40	6	9000 m	0-0.7



شکل ۱۴. اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب لیفت در هندسه سه بعدی و شرایط A.

جدول ۱۱. مقادیر عددی اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب لیفت.

With MHD		NON MHD	
0	0.00097	0	0.000802
5	0.0790	5	0.071
10	0.166	10	0.138
15	0.285	15	0.236
20	0.438	20	0.332
25	0.578	25	0.504
30	0.705	30	0.673
35	0.826	35	0.791
40	0.875	40	0.756



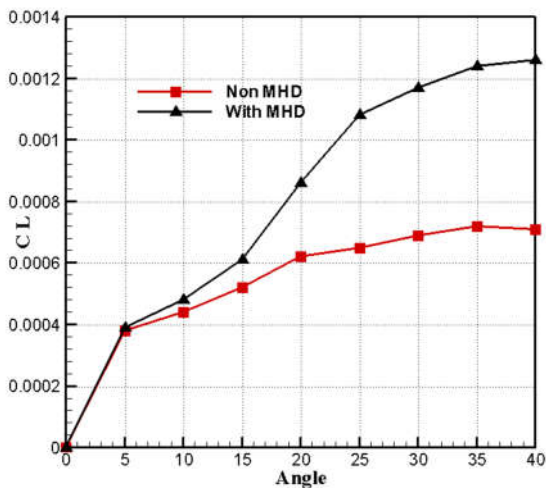
شکل ۱۵. اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب دراگ در هندسه سه بعدی و شرایط A.

جدول ۱۲. مقادیر عددی اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب دراگ.

With MHD		NON MHD	
0	0.0067	0	0.006
5	0.013	5	0.012
10	0.037	10	0.031
15	0.087	15	0.0732
20	0.175	20	0.133
25	0.281	25	0.268
30	0.427	30	0.398
35	0.598	35	0.581
40	0.757	40	0.668

جدول ۱۳. شرایط حل B برای هندسه سه بعدی.

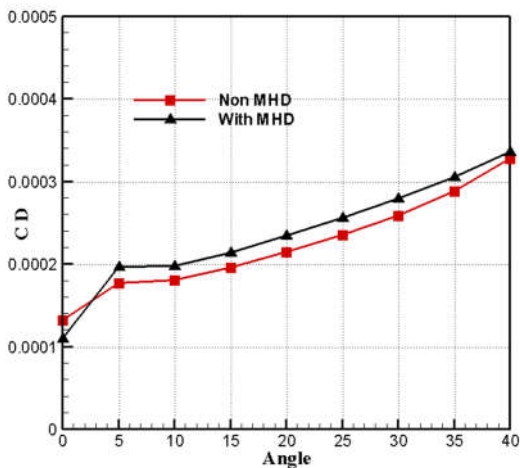
α (deg)	ماخ	ارتفاع	$B_o(T)$
0-40	8	50000 m	0-0.7



شکل ۱۶. اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب لیفت در هندسه سه بعدی و شرایط B.

جدول ۱۴. مقادیر عددی اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب لیفت.

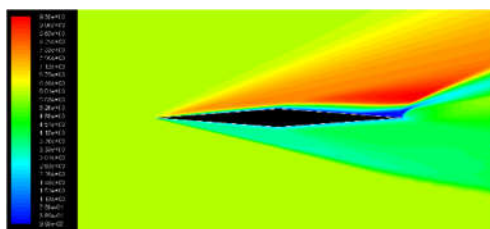
With MHD		NON MHD	
0	2.420×10^{-17}	0	2.1×10^{-16}
5	0.00039	5	0.00038
10	0.00048	10	0.00044
15	0.00061	15	0.00052
20	0.00086	20	0.00062
25	0.00108	25	0.00065
30	0.00117	30	0.00069
35	0.00124	35	0.00072
40	0.00126	40	0.00071



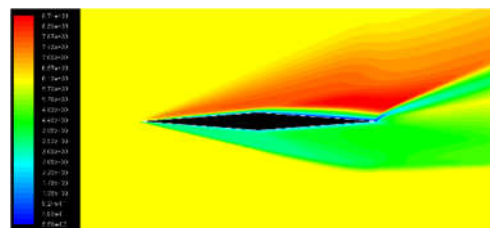
شکل ۱۷. اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب دراگ در هندسه سه بعدی و شرایط B.

جدول ۱۵. مقادیر عددی اثر زاویه حمله و اضافه کردن مگنت بر ضریب دراگ

With MHD		NON MHD	
0	0.0001101	0	0.0001323
5	0.000197	5	0.000177
10	0.000198	10	0.000181
15	0.000214	15	0.000196
20	0.000234	20	0.000215
25	0.000256	25	0.000235
30	0.000279	30	0.000259
35	0.000305	35	0.000288
40	0.000336	40	0.000328



شکل ۱۸. کانتور ماخ برای زاویه حمله ۱۰ درجه بدون MHD برای شرایط حل A و هندسه سه بعدی.



شکل ۱۹. کانتور ماخ برای زاویه حمله ۱۰ درجه با MHD برای شرایط حل A و هندسه سه بعدی.

و با اضافه کردن مگنت افزایش چشمگیری در ضرایب مشاهده شد. همچنین نشان داده شد در هیچکدام از حالت های بدون مگنت و با مگنت زاویه استال رخ نمی دهد که این امر ناشی از شرایط حل در فشار و ماخ بالا می باشد. خلاصه ای از نتایج به شرح زیر است:

- در کانتورهای ماخ حول هندسه دوبعدی نشان داده شد که در انتهای هندسه با جریان MHD جریان سکون کمتری به وجود می آید.
- در قسمت بررسی اثر جریان MHD و اثر زاویه حمله بر مقادیر ضریب دراگ و ضریب لیفت هندسه سه بعدی، دو شرایط حل بررسی شد یکی شرایط A، فشار ۹۰۰۰ و ماخ ۶ و دیگری شرایط B، فشار

در شکل های ۱۸ و ۱۹ کانتور ماخ برای شرایط حل B به صورت دو بعدی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود جریان سکون در پشت هندسه در حالت جریان MHD کاهش پیدا می کند. قابل ذکر است که این کانتور در مقطع وسط هندسه رسم شده است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر جریان MHD و اثر زاویه حمله بر مقادیر ضریب دراگ و ضریب لیفت هندسه دو بعدی پرداخته و مشاهده شد در زوایای حمله پایین تفاوت چندانی در مقادیر ضرایب لیفت و دراگ مشاهده نمی شود. اما با افزایش زاویه حمله

۵۰۰۰۰ و ماخ ۸. برای حالت A در زوایای حمله پایین تفاوت چندانی در مقادیر ضرایب لیفت و دراگ مشاهده نشد. اما با افزایش زاویه حمله و با اضافه کردن مگنت افزایش چشمگیری در ضرایب نشان داده شد.

- برای شرایط حل B نیز مشاهده شد که با افزایش فشار و افزایش ماخ زاویه استال به تاخیر می‌افتد. همچنین در این ارتفاع و ماخ میزان افزایش ضریب لیفت با اضافه کردن مگنت، نسبت به حالت بدون مگنت افزایش بسیار بیشتری نسبت به شرایط حل A داشت.

- با مشاهده تغییرات ضریب دراگ مشاهده شد که سیر صعودی ضریب دراگ با افزایش زاویه حمله نسبت به شرایط حل A کمتر می‌باشد.

- در کانتورهای ماخ برای شرایط حل B برای هندسه سه بعدی جریان سکون در پشت هندسه در حالت جریان MHD کاهش پیدا کرد.

- با مقایسه دو هندسه سه بعدی و دو بعدی مشاهده شد که زاویه استال در هندسه دو بعدی در حالت ارتفاع ۹۰۰۰ و ماخ ۶ رخ نداده اما در هندسه سه بعدی و همین شرایط حل (شرایط حل A) زاویه استال برای حالت بدون MHD اتفاق افتاده، که علت این امر را می‌توان در خط جریانی بودن هندسه دو بعدی دانست. البته در ادامه مشاهده شد که با اضافه کردن مگنت در هندسه سه بعدی و شرایط حل مذکور این زاویه به تاخیر افتاده است.

- بیشترین درصد افزایش ضریب لیفت برای هندسه سه بعدی و شرایط ماخ ۸ و ارتفاع ۵۰۰۰۰ متر رخ داده است که ۷۷.۵٪ افزایش در ضریب لیفت ناشی از میدان مغناطیسی مشاهده شده است.

- [۷] L. Leger, E. Moreau, G. Artana, G. Touchard, Influence of a DC corona discharge on the airflow along an inclined fat plate, *Journal of Electrostatics*, Vol. 51-52, pp. 300-306, 2010.
- [۸] S. Roberto, A. Guillermo, Steady control of laminar separation over airfoils with plasma sheet actuators, *Electrostatics*, Vol. 64, pp. 604-610, 2016.
- [۹] E. Esmailzadeh, M. Aghazainali, Numerical investigation of flow around circular cylinder affected by an electrohydrodynamic flush mounted wireplate actuator, *Journal of Faculty of Eng*, Vol. 32, No. 2, 2006.
- [۱۰] Gh. Tathiri, E. Esmailzadeh, The effect of EHD phenomenon on the control of sheet boundary layer over a cylinder using two electrode wires and two attached tape electrodes to the surface of the cylinder, *International Journal of Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 51-60, 2015. (in persian)
- [۱۱] Yi-Nan, Zhang, Cao Hui-Jing, and Zhang Ming-Ming. "A calculation method for modeling the flow characteristics of the wind turbine airfoil with leading-edge protuberances." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 212 (2021): 104613.
- [۱۲] Zhu, Linyang, Weiwei Zhang, Xuxiang Sun, Yilang Liu, and Xianxu Yuan. "Turbulence closure for high Reynolds number airfoil flows by deep neural networks." *Aerospace Science and Technology* 110 (2021): 106452.
- [۱۳] Zhi, Haolin, Zhenhao Zhu, Yujin Lu, Shuanghou Deng, and Tianhang Xiao.
- [۱] A. Salmasi, A. Shadaram, M. Mirzaei, A. Sh. Taleghani, Numerical and experimental investigation on the effect of a plasma actuator on NLF0414 airfoil's efficiency after the stall, *Modares Mechanical Engineerin*, Vol. 12, No. 6, pp. 104-116, 2013.
- [۲] Seyed Saeed Hoseininezhad, Nima Amanifard*, Hamed Mohaddes Deylami, Farid Dolati, Numerical study of low characteristics around a NACA 4412 asymmetric airfoil under the influence of electric field, *Modares Mechanical Engineerin*, 2014.
- [۳] Xisto, Carlos M., et al. "Implementation of a 3D compressible MHD solver able to model transonic flows." Proc. ECCOMAS CFD 2010-V European Conference on Computational Fluid Dynamics. 2010.
- [۴] L. Zhao, K. Adamiak, Numerical simulation of the electrohydrodynamic flow in a single wire plate electrostatic precipitator, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 44, pp. 683-691, 2013.
- [۵] Y. Tada, A. Takimoto, D. Ueda, Y. Hayashi, Heat Transfer Enhancement a Convective Field with Corona Discharge, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B*, pp. 217-228, 2003.
- [۶] K. T. Hyun, C. H. Chun, The wake flow control behind a circular cylinder using ion wind, *Experiments in Fluids*, Vol. 35, pp. 541-552, 2014.

"Aerodynamic performance enhancement of co-flow jet airfoil with simple high-lift device." *Chinese Journal of Aeronautics* (2021).

[۱۴] Lee, Young Mo, Jae Hwa Lee, Lawrence Prince Raj, Je Hyun Jo, and Rho Shin Myong. "Large-eddy simulations of complex aerodynamic flows over multi-element iced airfoils." *Aerospace Science and Technology* 109 (2021): 106417.

[۱۵] Albers, Marian, and Wolfgang Schröder. "Lower drag and higher lift for turbulent airfoil flow by moving surfaces." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 88 (2021): 108770.

[۱۶] Holman, Jiří, and Jiří Fürst. "Numerical simulation of separation induced laminar to turbulent transition over an airfoil." *Journal of Computational and Applied Mathematics* (2021): 113530.

[۱۷] Ryakhovskiy, Aleksey Igorevich, and A. A. Schmidt. "MHD supersonic flow control: OpenFOAM simulation." *Труды Института системного программирования РАН* 28, no. 1 (2016)