

# مطالعه عددی تأثیرات میدان مگنتوهیدرودینامیک بر جدایش جریان ناشی از موج شوک انعکاسی

سید آرش سید شمس طالقانی<sup>۱</sup>، احمد قنبری مطلق<sup>۲</sup> و سهیلا عبداللهی پور<sup>۳</sup>

پژوهشگاه هوافضا

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۸)

## چکیده

در فرآیند تشکیل موج شوک انعکاسی، جدایش جریان در محل انعکاس، یک پدیده متداول است. این پدیده که به جدایش جریان القایی از شوک معروف است، در برخی موارد منجر به وقوع اتفاقات نامطلوب مانند کاهش حجم و اختلال در جریان هوای ورودی به موتورهای راجت و اسکرمجت می‌شود. لذا سعی می‌شود به روش‌های کنترل جریانی مختلف این اثرات نامطلوب کاهش یابد. در تحقیق حاضر به وسیله مگنتوهیدرودینامیک که یکی از روش‌های پیشرفته کنترل جریان فعال است، با شتاب‌دهی به لایه مرزی به وسیله نیروی لورنتس، حباب جدایش کوچک می‌شود. هدف این پژوهش مطالعه عددی تأثیرات این روش بر جدایش ناشی از موج شوک انعکاسی و همچنین زاویه موج شوک است. شبیه‌سازی در شرایط دویعدی به ازای اعداد هارتمن مختلف انجام و تأثیرات آن بر مشخصات جریان مانند فشار، سرعت و خطوط جریان بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که اعمال میدان مگنتوهیدرودینامیک می‌تواند به‌طور قابل توجهی گرادیان فشار معکوس و جریان گردابه‌ای را کاهش داده و اندازه حباب جدایش را ۴۰ درصد کوچک کند. علاوه بر آن اعمال این میدان زاویه شوک را کمتر کرده که منجر به حرکت رو به جلو حباب جدایش تا حدود ۲ درصد طول کانال شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مگنتوهیدرودینامیک، کنترل جریان، موج شوک انعکاسی، جدایش جریان

## Numerical Study of the Effects of Magnetohydrodynamic Fields on Shock-Induced Flow Separation

A. Shams Taleghani, A. Ghanbari Motlagh and S. Abdolahipour

Aerospace Research Institute

(Received: 04/November/2019 ; Accepted:28/June/2020)

### ABSTRACT

In the process of forming a reflective shock wave, the separation of the flow in the reflection site is a common phenomenon. This phenomenon, known as the shock-induced flow separation, sometimes leads to undesirable effects such as reducing the volume and disrupting the flow of air into the ramjet and scramjet engines. Therefore, we try to reduce these undesirable effects by different flow control methods. Magnetohydrodynamics is one of the advanced methods for controlling the flow, which shrinks the bubble separation by accelerating to the boundary layer by Lorentz force. The purpose of this research is the numerical study of the effects of this method on the separation caused by the reflection shock wave. The simulations are performed in two-dimensional conditions for different Hartmann numbers and the effects on flow characteristics such as pressure, velocity and flow stream line are investigated. The results indicate that the application of the magnetohydrodynamic field can significantly reduce the adverse pressure gradient and the vortex flow, and it can also reduce the size of the separation bubble by 40% and increase the skin friction coefficient by increasing the wall shear stress. Moreover, the application of the magnetohydrodynamic field can change the shock angle, causing the separation bubble to move forward by about 2% of the channel length.

**Keywords:** Magnetohydrodynamic, Flow Control, Reflective Shock Wave, Flow Separation.

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): Taleghani@Ari.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد: Ahmad.Ghanbari68@gmail.com

۳- مربی: Sabdolahi@Ari.ac.ir



مطالعه توسط بالاسوبرمن و همکاران [۲] جهت صحنه‌گذاری روش حل عددی حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که اعمال میدان مگنتوهیدرودینامیک می‌تواند به‌طور قابل توجهی اندازه حباب جدایش را کوچک نماید. لازم به توضیح است، در شبیه‌سازی‌هایی که در این زمینه انجام شده، یک موج شوک فرضی روی صفحه تخت مورد مطالعه قرار گرفته است [۲ و ۵]. در این مراجع تأثیر میدان مگنتوهیدرودینامیک بر تغییر زاویه موج شوک و در نتیجه حرکت به سمت جلو حباب جدایش دیده نشده است. در مطالعه حاضر با شبیه‌سازی یک تونل مافوق صوت، علاوه بر آنکه تأثیر میدان مگنتوهیدرودینامیک بر اندازه حباب جدایش مورد مطالعه قرار گرفته است، تأثیر این میدان بر تغییر زاویه موج شوک در چنین شرایطی نیز در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در مطالعات تجربی مرجع [۱۵] تغییر زاویه موج شوک کاملاً تأیید شده است. این موضوع گرچه زمان محاسبات را افزایش داده و روش حل را حساس‌تر می‌کند، اما باعث می‌شود که شرایط شبیه‌سازی به شرایط واقعی و کاربردی مشابه با ورودی هوای موتور یک هواپیمای مافوق صوت نزدیک‌تر شده و تأثیرات سایر عوامل پیرامونی نیز در حل نظر گرفته شود.

## ۲- معادلات حاکم

ارائه معادلات حاکم بر علم MHD نیازمند بررسی جزئیاتی در زمینه نظریه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و تأثیر آن‌ها بر خواص فیزیکی سیال عامل در فرآیندهای الکترومغناطیسی است. لذا در علم MHD معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی همراه با عباراتی که در برگزیده آثار الکتریکی و مغناطیس باشند، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

### ۲-۱- معادلات MHD با هدف تغییر شتاب سیال

در این بخش ابتدا معادلات حرکت در جریان سیال رسانای الکتریکی در یک مجرا با اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بررسی می‌شود. فرض می‌شود که جریان سیال رسانا با هدایت الکتریکی ثابت  $\sigma$ ، پایدار یک بعدی، بدون اصطکاک و با انتقال حرارت ناچیز (جریان آدیاباتیک) می‌باشد.

در مسائل کنترل موج شوک انعکاسی به روش MHD با شتاب‌دهی به لایه مرزی به‌وسیله نیروی لورنتس حباب جدایش کوچک و یا حتی از بین می‌رود. در مطالعه‌ای که توسط آدگاو<sup>۱</sup> و همکارانش [۸] انجام شد، با اعمال نیروی لورنتس<sup>۲</sup> سایز حباب جدایش ۱۰ درصد کاهش یافت. در مطالعات زیادی<sup>۳</sup> و همکاران [۹] با اعمال نیروی لورنتس در ناحیه سرعت پایین لایه مرزی، سرعت جریان از ۳۵۰ متر بر ثانیه به ۲۰۰۰ متر بر ثانیه رسید. این فرآیند منجر به کاهش احتمال جدایش لایه مرزی شد. در سال‌های اخیر مطالعات تجربی [۱۰-۱۳] و همچنین عددی [۱۴ و ۱۵] بسیاری در زمینه مسائل کنترل موج شوک انعکاسی به روش MHD انجام شده است. در مرجع [۱۰] برای مطالعه تأثیر محرک‌های مگنتوهیدرودینامیک بر لایه مرزی موج شوک، یک کد عددی بر اساس معادلات دو بعدی ناویر-استوکس و وابسته به زمان توسعه داده شده است. تأثیر ستونی از پلاسمای تشکیل‌شده از طریق قوس الکتریکی میان دو الکترود واگرا، بر جدایش لایه مرزی القایی از طریق موج شوک، بررسی شده است [۱۱ و ۱۲]. در مرجع [۱۴] تأثیر پارامتر بار<sup>۴</sup> و همچنین پارامتر تعاملی مغناطیسی<sup>۵</sup> به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. چانگ‌بینگ و همکارانش [۱۵] تأثیر میدان مگنتوهیدرودینامیک بر کنترل جریان سیال لزج و مافوق صوت حول یک گوشه که جریان در آن فشرده می‌شود، را بررسی و تحقیق نمودند.

در مطالعه حاضر جریان اطراف یک شوک که در نتیجه عبور جریان مافوق صوت از یک مجرا و برخورد آن به دیواره بالایی با زاویه انحراف معلوم نسبت به سطح افق ایجاد شده است، کنترل می‌شود. موج شوک ایجادشده پس از برخورد به دیواره پایینی، باعث ایجاد گرادیان فشار معکوس و در نهایت جدایش به‌صورت محلی می‌شود. هدف این پژوهش مطالعه عددی تأثیرات روش کنترل جریان فعال به‌وسیله مگنتوهیدرودینامیک بر کوچک کردن حباب جدایش و همچنین تغییر زاویه موج شوک می‌باشد. شبیه‌سازی در شرایط دوبعدی در نرم‌افزار تجاری Ansysfluent، با به‌کارگیری ماژول MHD انجام شده است. مدل عددی مورد

<sup>1</sup> Udagawa

<sup>2</sup> Lorentz

<sup>3</sup> Zaidi

<sup>4</sup> Load Parameter

<sup>5</sup> Magnetic Interaction Parameter

-عبارت آخر بیانگر نیروهای فشاری روی دیواره‌های جانبی حجم معیار است.

-نیروی الکترومغناطیسی یا به‌طور دیگر نیروی لورنتس وارد بر واحد حجم  $J \times B$  است.

معادله مومنوم با ساده کردن و حذف عبارت‌های درجه دوم به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\rho V \frac{dV}{dx} + \frac{dP}{dx} = -JB \quad (5)$$

معادله انرژی با توجه به رابطه قبل برای جریان پایدار، یک بعدی و آدیباتیک عبارت است از:

$$\iint_S \left( h + \frac{V^2}{2} \right) (\rho V \cdot dA) = -\frac{dW}{dt} \quad (6)$$

-W معرف کار انجام‌شده توسط حجم معیار است  
نرخ انجام کار را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{dW}{dt} = JEAdx \quad (7)$$

با جایگزینی این رابطه در رابطه قبل داریم:

$$\rho AVdh + \rho AV^2 dV = -JEAdx \quad (8)$$

با فاکتورگیری و حذف A داریم:

$$\rho Vdh + \rho V^2 dV = -JEdx \quad (9)$$

گرمایش ژول از این معادله استخراج می‌شود.

## ۲-۲- گسسته سازی معادلات در حل عددی

در ادامه فرم مناسب حل عددی و دو بعدی معادلات MHD که شامل حل همزمان معادلات ناویراستوکس، ماکسول و اهم است، بیان می‌شود.

شکل بدون بعد معادلات ناویراستوکس در مختصات کارتزین، به شکل بقایی و با در نظر گرفتن اثرات مگنتوهیدرودینامیک به فرم زیر است.

$$\frac{\partial U}{\partial T} + \frac{\partial F}{\partial X} + \frac{\partial G}{\partial Y} = \frac{\partial F_v}{\partial X} + \frac{\partial G_v}{\partial Y} + S_{MHD} \quad (10)$$

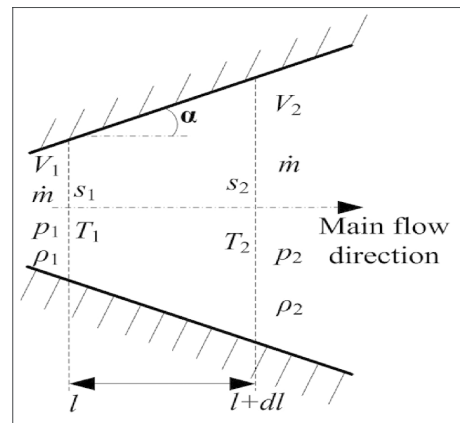
که U برداری از متغیرهای بقایی به شرح زیر است.

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e_t \end{bmatrix} \quad (11)$$

جریان گاز در جهت مثبت x، میدان مغناطیسی اعمال شده با بزرگی B در جهت منفی z و میدان الکتریکی اعمال شده با بزرگی E در جهت منفی است. مشخصات میدان‌ها و جریان به‌طور خلاصه در ماتریس زیر آمده است:

	x	y	z
B	0	0	$B_z$
E	0	$E_y$	0
V	$V_x$	0	0
J	0	$J_y$	0
$J \times B$	$J_y B_z$	0	0

یک حجم معیار را مطابق شکل ۴ انتخاب می‌شود.



شکل (۴): حجم معیار در معادلات

از معادله پیوستگی در جریان پایدار داریم:

$$\iint_S \rho V \cdot dA = 0 \quad (1)$$

و یا

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (2)$$

معادله مومنوم برای جریان پایدار در جهت X عبارت است از:

$$\sum F_x = \iint_S V_x (\rho V \cdot dA) \quad (3)$$

که نیروهای وارد بر سیال در حجم معیار شامل نیروهای فشاری و نیروهای الکترومغناطیسی است. نیروهای فشاری عبارت‌اند از:

$$PA - (P + dP)(A + dA) + \left( P + \frac{dP}{2} \right) dA \quad (4)$$

عدد هارتمن یک کمیت بدون بعد است که به صورت نسبت نیروی الکترومغناطیس به نیروی لزجت تعریف می‌شود. این کمیت که با نماد  $Ha$  نشان داده می‌شود نخستین بار توسط هارتمن تعریف شد.

عدد بی بعد هارتمن به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Ha = B_{\infty} L \sqrt{\frac{\sigma}{\mu_{\infty}}} \quad (21)$$

در این رابطه:

$B$  مقدار میدان مغناطیسی،  $L$  طول مشخصه،  $\sigma$  رسانایی الکتریکی و  $\mu_{\infty}$  لزجت دینامیک است.

### ۳- الگوریتم حل روش MHD در نرم‌افزار Ansys

مگنتوهیدرودینامیک به تعامل میان میدان الکترومغناطیس و جریان سیال رسانای الکتریکی اشاره دارد. نرم‌افزار فلوننت قادر است، رفتار سیال رسانای الکتریکی را تحت اثر میدان‌های الکترومغناطیسی ثابت و نوسانی شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل کند. یک الگوریتم ساده از حل در نرم‌افزار انسیس با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تابعه آن شامل  $ansysmeshing$ ،  $spaceclaim$  و  $ansysfluent$  در شکل ۵ نشان داده شده که در این مطالعه برای حل جریان از مدل آشفتگی اسپالارت آلماراس<sup>۱</sup> استفاده شده است. مدل اسپالارت آلماراس یک مدل یک معادله‌ای است. این مدل به طور خاص برای کاربردهای هوافضا شامل جریان‌های محدود به دیوار طراحی شده است و نشان داده شده است که نتایج خوبی برای لایه‌های مرزی در معرض گرادیان‌های فشار معکوس می‌دهد. مدل اسپالارت آلماراس یک مدل مؤثر در جریان‌های با رینولدز پایین است. به طور دیگر این مدل به منطقه تحت تأثیر لزجت نیاز دارد که بتواند به طور مناسب مدل‌سازی را انجام دهد ( $y+ \sim 1$ ).

در حل عددی مطالعه حاضر، باقی‌مانده در حل معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و ... به عنوان معیار همگرایی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه حل تا زمانی ادامه پیدا کرد که میانگین تغییرات باقی‌مانده حل معادلات بقایی و MHD به یک مقدار ثابت رسید. مقدار باقی‌مانده در معادلات مختلف بین  $10^{-2}$  تا  $10^{-8}$  متغیر بوده است آمده است.

که در آن  $u$  و  $v$  متغیرهای کارتیزین سرعت و  $\rho$  جرم مخصوص و  $e$  انرژی کل به ازای واحد حجم که با فشار به صورت زیر در ارتباط است:

$$p = (\gamma - 1) \left[ e - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \right] \quad (12)$$

در طرف اول معادله (۱)،  $F$  و  $G$  جملات غیر لزج و طرف دوم،  $G_v$  و  $F_v$  بیان‌گر جملات لزج یا جابجایی هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$F = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho v u \\ (e + p)u \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v u \\ p + \rho v^2 \\ (e + p)v \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$F_v = \frac{1}{Re} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xy} + u\tau_{xy} + q_x \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$G_v = \frac{1}{Re} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xy} + u\tau_{xy} + q_x \end{bmatrix} \quad (16)$$

$S_{MHD}$  نیروی حجمی ناشی از اعمال مگنتوهیدرودینامیک،  $B$  میدان مغناطیسی و  $j$  شار جریان الکتریکی به شرح زیر با همدیگر در ارتباط می‌باشد.

$$S_{MHD} = S \begin{bmatrix} 0 \\ j_y B_z - j_z B_y \\ j_z B_x - j_x B_z \\ E_z j_z + E_y j_y + E_x j_x \end{bmatrix} \quad (17)$$

که در آن:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (18)$$

$$q_i = \frac{1}{(\gamma-1)M^2} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (19)$$

$$j_y = 0, \quad j_x = 0, \quad j_z = \sigma [uB_y - uB_x]$$

$$S = \frac{\rho_0 B_0^2 L}{\rho_{\infty} U_{\infty}} \quad (20)$$

<sup>1</sup> Spalart-Allmaras

#### ۴- مدل فیزیکی

در این پژوهش جریان تراکم‌پذیر عبوری از یک حوزه محاسباتی در حالت دوبعدی شبیه‌سازی شده است. مشخصات جریان سیال و شرایط محیط پیرامونی منجر به ایجاد یک موج شوک مایل شده است که در پی آن موج شوک انعکاسی و جدایش جریان در محل برخورد آن با دیواره پایین به وقوع می‌پیوندد. تونل در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی دارای ابعاد ارتفاع ورودی ۳۰۰ میلی‌متر، ارتفاع خروجی ۱۴۰ میلی‌متر و طول ۱۰۰۰ میلی‌متر در جهت X می‌باشد و زاویه انحراف دیواره بالایی نسبت به سطح افق ۱۲/۸ درجه است (شکل ۶). شرایط جریان مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): شرایط جریان در شبیه‌سازی

مشخصه جریان	مقدار	واحد
ماخ	۳	-
رینولدز	۱۰۰۰۰	-
لزجت	$1/7895 \times 10^{-5}$	Kg/ms
رسانایی الکتریکی	۱۷/۸	Siemens
نفوذپذیری مغناطیسی	$4\pi \times 10^{-7}$	N/A2

با توجه به اینکه هدف این تحقیق، مطالعه جدایش جریان در محل برخورد و انعکاس موج شوک می‌باشد، مشخصات جریان در این ناحیه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. لذا برای تولید شبکه محاسباتی این ناحیه از حوزه محاسباتی (فاصله ۵۷۰ تا ۶۷۰ میلی‌متری از مبدأ مختصات در جهت X- شکل ۶)، یک ناحیه جدا شده و با شبکه محاسباتی ریزتر مورد بررسی قرار گرفت. این ناحیه از لحاظ شکل و ساختار مطابق ناحیه محاسباتی مرجع [۳] می‌باشد.

#### ۵- شبکه محاسباتی و مطالعه استقلال از شبکه

در شکل ۷ نمایی از شبکه محاسباتی نشان داده شده است. همان‌طور که اشاره شده محل برخورد و انعکاس شوک از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا در این پژوهش این ناحیه به‌طور خاص شبکه‌بندی و مورد مطالعه قرار گرفته است.

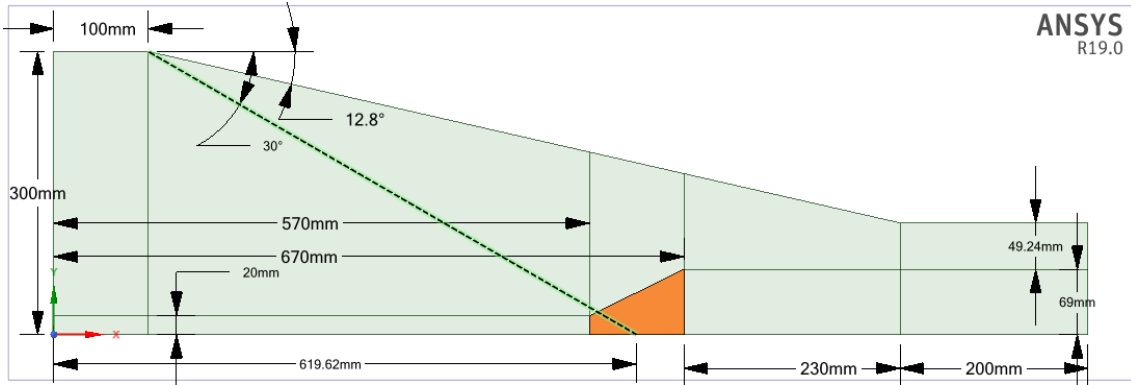
در حل‌های عددی مطالعه استقلال جواب از شبکه بر اساس مقادیر متوسط عددی متغیرهای میدان جریان مانند عدد ماخ، مؤلفه‌های سرعت، محل برخورد موج ماخ و فشار استاتیکی حائز اهمیت است. در این پژوهش شبیه‌سازی‌ها به



شکل (۵): الگوریتم حل در نرم‌افزار ansys

برابر صفر مطابق شکل ۸ می‌باشد. شبکه نهایی که برای این پژوهش انتخاب شده است، یک شبکه سازمان یافته با ۱۴۷۳۳۳ گره است.

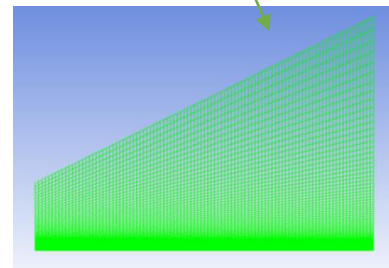
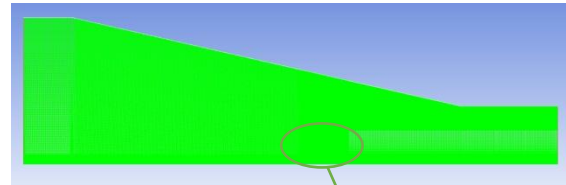
ازای ۳ مقدار مختلف از تعداد المان‌های محاسباتی انجام و مقایسه شد. نتایج مطالعه استقلال از شبکه برای پروفیل میدان سرعت در میانه حباب در هارتمن



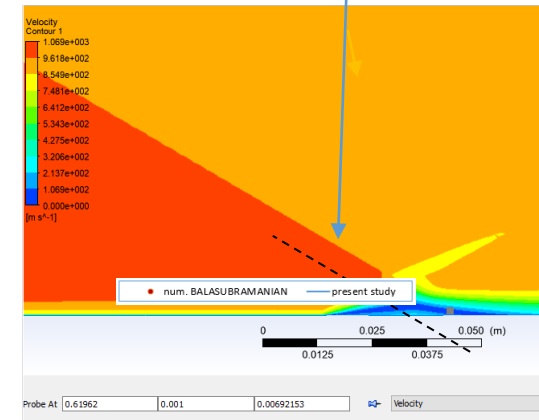
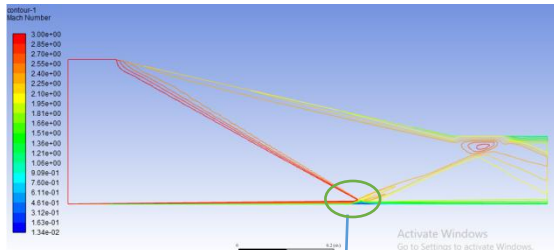
شکل (۶): نمایی از ابعاد حوزه محاسباتی و محل برخورد شوک.

۶- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، با توجه به شرایط اولیه و شرایط مرزی که در این پژوهش در نظر گرفته شده است و بر اساس نتایج تحلیلی، زاویه شوک باید ۳۰ درجه و محل برخورد آن با دیواره پایین باید در حدود ۶۲۰ میلی‌متری از ابتدای کانال باشد (شکل ۹).

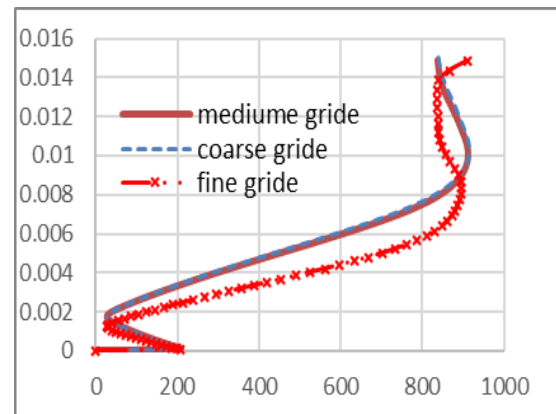


شکل (۷): نمایی از شبکه محاسباتی

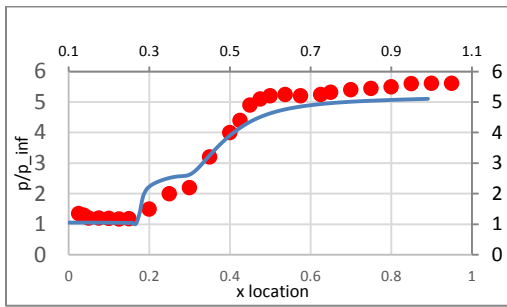


شکل (۹): محل برخورد امتداد شوک با دیواره پایین

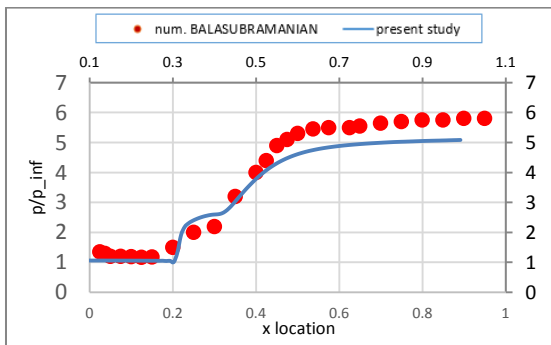
سنجش‌گر مکانی نشان می‌دهد که امتداد موج شوک دقیقاً از محل  $x=0.61962$  m می‌گذرد، لذا زاویه شوک



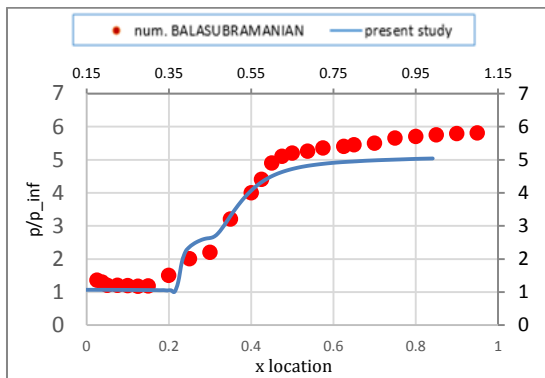
شکل (۸): بررسی استقلال از شبکه (پروفیل سرعت در میانه حباب جدایش در  $ha=0$ )



شکل (۱۲): نمودار توزیع فشار روی دیواره در Ha=9000



شکل (۱۳): نمودار توزیع فشار روی دیواره در Ha=10000



شکل (۱۴): نمودار توزیع فشار روی دیواره در Ha=12000

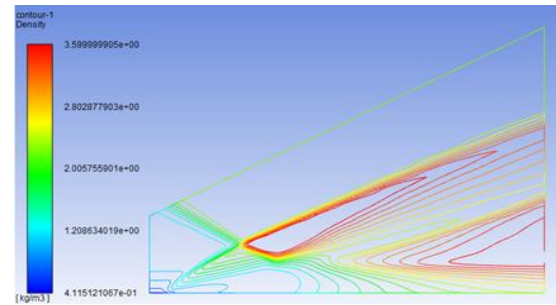
جدول (۲): درصد خطای حداکثر خطای نقطه به نقطه در هارتمن‌های مختلف

Ha	درصد حداکثر خطای نقطه به نقطه
0	14
9000	15
10000	13
12000	16

علاوه بر این تحلیل نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که با افزایش هارتمن، زاویه موج شوک کاهش یافته و در نتیجه حباب جدایش از لحاظ موقعیت مکانی به جلو حرکت می‌کند. در مرجع [۲] شوکی که بر روی آن مطالعه انجام شده است یک شوک فرضی است اما در این مطالعه، شوک

۳۰ درجه و مطابق با نتایج محاسبات تحلیلی است.

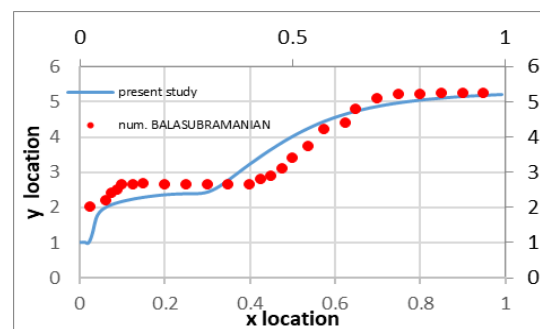
شکل ۱۰ کانتور توزیع جرم مخصوص در محل برخورد شوک با دیواره پایین در  $Ha=0$  را نشان می‌دهد. رفتار کلی خطوط هم جرم مخصوص و همچنین مقادیر آن مشابه نتایج به دست آمده در مرجع [۳] می‌باشد.



شکل (۱۰): کانتور جرم مخصوص روی دیواره در محل تشکیل حباب جدایش در  $Ha=0$

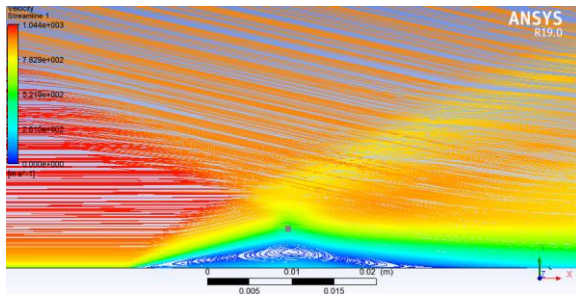
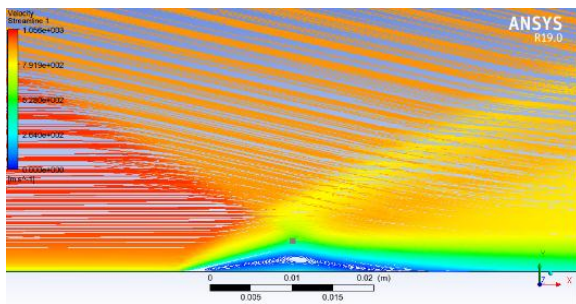
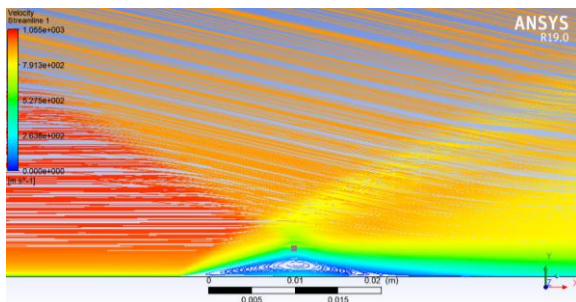
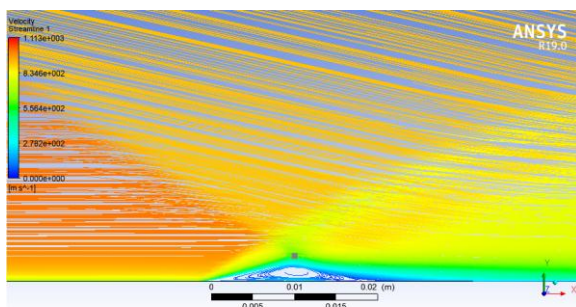
شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نمودارهای توزیع فشار روی دیواره پایین در محل تشکیل حباب جدایش را نشان می‌دهد. اعداد روی محور Y معرف مقادیر فشار به فشار جریان آزاد و اعداد روی محور X در پایین و بالا به ترتیب موقعیت مکانی روی دیواره برای مقادیر مرجع [۲] و مطالعه حاضر است که بر اساس اندازه طولی حباب جدایش در هارتمن صفر ( $Ha=0$ ) بی‌بعد شده است. این نمودارها با نمودارهای مشابه در مرجع [۲] اعتبارسنجی شده‌اند.

تحلیل نمودارهای ۹ تا ۱۴ نشان می‌دهد که نتایج مطالعه حاضر با نتایج مرجع [۲] از لحاظ نحوه توزیع فشار در طول حباب در اکثر نقاط مطابقت خیلی خوبی دارد. اما فقط در برخی نقاط اختلاف بین نتایج زیاد می‌شود. حداکثر اختلاف در برخی نقاط به شرح جدول ۲ است.



شکل (۱۱): نمودار توزیع فشار روی دیواره در  $Ha=0$

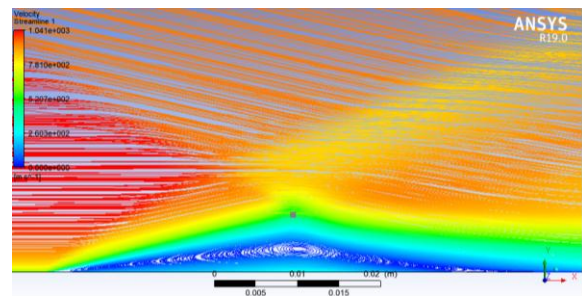
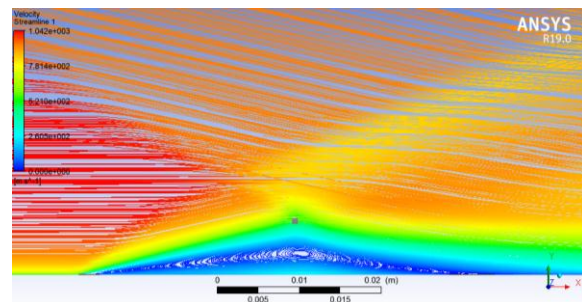


شکل (۱۷): خطوط جریان در  $Ha=6000$ شکل (۱۸): خطوط جریان در  $Ha=9000$ شکل (۱۹): خطوط جریان در  $Ha=10000$ شکل (۲۰): خطوط جریان در  $Ha=12000$ 

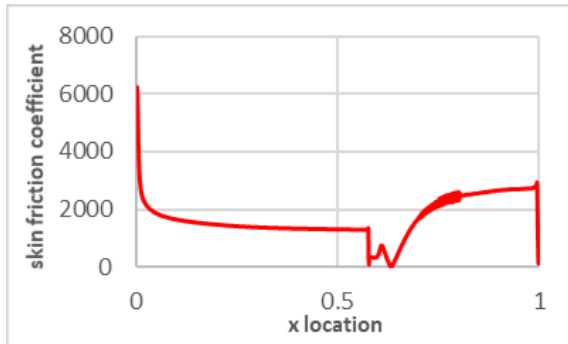
شکل ۲۱ نمودار پروفیل سرعت در  $x=0.3$  به ازای هارتمن‌های متفاوت را نشان می‌دهد. در  $x=0.3$  میانه حباب در  $Ha=0$  است. روند کلی رفتار پروفیل سرعت مشابه مقادیر مراجع [۲] و [۵] می‌باشد. این نمودار نیز بیانگر آن است که افزایش عدد هارتمن می‌تواند ارتفاع حباب جدایش را کمتر

حاصل از برخورد جریان سیال با یک سطح شیبدار بوده و در واقع شوک تولید شده است. مطالعات تجربی مرجع [۱۵] نشان می‌دهد که اعمال میدان MHD بر روی شوک، می‌تواند باعث کاهش زاویه آن شود. این مسئله نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر را صحنه‌گذاری می‌کند. تحلیل روند تغییرات فشار به فشار جریان آزاد در محل برخورد شوک در جهت  $X$  نشان می‌دهد که جریان در دو موقعیت (یک جفت) دارای گرادیان فشار معکوس است. به عنوان مثال در  $Ha=0$  اولین گرادیان فشار معکوس در  $x=0.02$  و دومین در  $x=0.3$  اتفاق می‌افتد که بیانگر تشکیل حباب جدایش و چسبندگی مجدد جریان است. همچنین این نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش هارتمن ناحیه‌ای از دیواره که دارای نسبت توزیع فشار یک است، گسترش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که با افزایش هارتمن، محل تشکیل حباب جلوتر رفته و حباب نیز کوچک‌تر می‌شود.

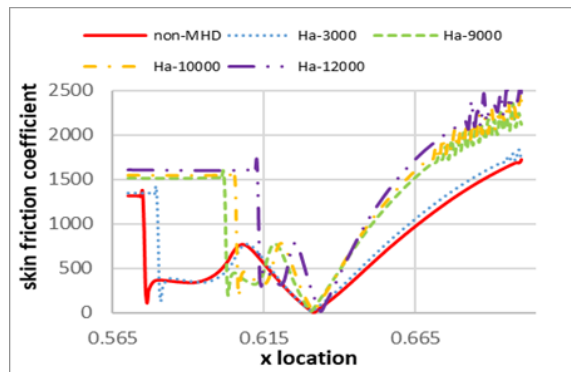
شکل‌های ۱۵ تا ۲۰ خطوط جریان و حباب جدایش را به‌ازای هارتمن‌های مختلف نشان می‌دهد. تحلیل شکل‌ها نشان می‌دهد که افزایش هارتمن می‌تواند اندازه حباب جدایش را حدود ۴۰ درصد کاهش دهد. علاوه بر آن حباب جدایش حدود ۲ درصد طول کانال به جلو حرکت کرده است.

شکل (۱۵): خطوط جریان در  $Ha=0$ شکل (۱۶): خطوط جریان در  $Ha=3000$

شوک، ضریب اصطکاک پوسته‌ای به یکباره دچار افت شدید شده و پس آن نیز بیش از پیش افزایش می‌یابد. این افت ناشی از جدایش جریان سیال از دیواره در این ناحیه می‌باشد. شکل ۲۳ نمودار ضریب اصطکاک پوسته‌ای را به‌طور خاص در ناحیه زیرین حباب جدایش به هنگام اعمال میدان MHD به ازای هارتمن‌های متفاوت نشان می‌دهد. نکته بسیار مهم این نمودار آن است که با افزایش هارتمن، ضریب اصطکاک پوسته‌ای در این ناحیه و همچنین ماکزیمم این ضریب که پس از آن اتفاق می‌افتد، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.



شکل (۲۲): نمودار ضریب اصطکاک پوسته‌ای به ازای  $Ha=0$  بر روی دیواره پایینی کانال



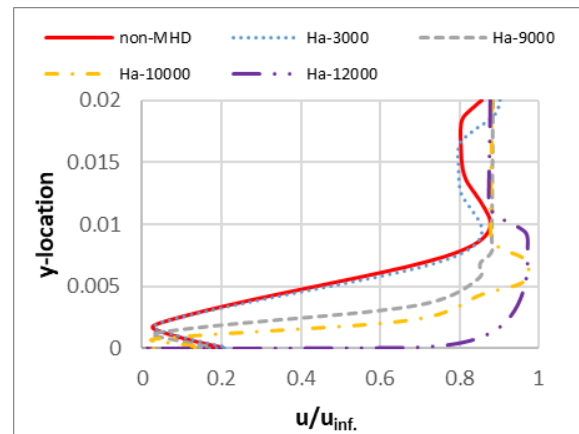
شکل (۲۳): نمودار ضریب اصطکاک پوسته‌ای به ازای هارتمن‌های متفاوت در زیر ناحیه حباب جدایش

## ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مسئله تأثیر میدان مگنتوهیدرودینامیک بر موج شوک انعکاسی مورد بررسی قرار گرفت.

مطالعه در یک حوزه محاسباتی دو بعدی که دیواره بالایی آن دارای زاویه انحراف  $12/8$  است صورت پذیرفت.

کرده تا نهایتاً در هارتمن  $12000$  مشاهده می‌شود که تقریباً در این موقعیت مکانی ارتفاع حباب جدایش به صفر می‌رسد. لازم به توضیح است همان‌طور که در بخش قبل نیز اشاره شده با افزایش عدد هارتمن، زاویه شوک و موقعیت مکانی حباب در راستای  $x$  تغییر می‌کند؛ لذا در هارتمن  $12000$  با وجود آنکه حباب جدایش همچنان وجود دارد، مومنتوم سیال در نزدیک سطح افزایش یافته است و با توجه به این نمودار گرادیان سرعت نرمال نزدیک به دیواره افزایش می‌یابد؛ در نتیجه ضخامت لایه لزج کاهش یافته و تقریباً به صفر می‌رسد. این موضوع تأییدکننده آن است که دیگر میانه در این موقعیت مکانی قرار ندارد و جابجا شده است.



شکل (۲۱): نمودار پروفیل سرعت در  $x=0.3$  به ازای هارتمن‌های متفاوت

یکی از پارامترهایی که در جریان‌های نزدیک دیواره بسیار اهمیت دارد نیروی پسای وارده بر جریان سیال است. ضریب اصطکاک پوسته‌ای یک پارامتر مهم بدون بعد در جریان لایه‌های مرزی است. ضریب اصطکاک پوسته‌ای، نیروی پسای را با توجه به تنش برشی وارده بر دیواره بیان می‌کند. این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_f = \frac{T_\omega}{q} \quad (22)$$

در این رابطه  $T_\omega$  تنش برشی روی دیواره و  $q$  فشار دینامیک جریان آزاد است.

شکل ۲۲ نمودار ضریب اصطکاک پوسته‌ای در هارتمن برابر صفر را برای دیواره پایینی کانال نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در ناحیه برخورد و انعکاس

انعکاسی، باید با در نظر گرفتن معایب و مزایای آن، محتاطانه عمل کرد.

## ۸- مراجع

1. Anderson, J.D. "Modern Compressible Flow With Historical Perspective", Mc Graw Hill. Series in Aeronautical and Aerospace Engineering, Maryland, USA, 2003.
2. Balasubramanian, R. and Krishnamurth, R. "Mitigation of Shock-induced Flow Separation Using Magnetohydrodynamic Flow Control", Sadhana, Vol. 42, no. 3, pp. 379-390, 2017.
3. Liu, Q., Baccarella, D., Lee, T., Hammack, S., Carter, C.D. and Do, H. "Influences of Inlet Geometry Modification on Scramjet Flow and Combustion Dynamics", J. Propul. Power, Vol. 33, no. 5, pp. 1179-1186, 2017.
4. Waltrup, P.J. and Billig, F.S. "Structure of Shock Wave in Cylindrical Ducts" AIAA J, Vol. 11, no. 10, pp. 1404-1408, 1973.
5. Su, W.Y., Chang, X.Y. and Zhang, K.Y. "Effects of Magnetohydrodynamic Interaction-Zone Position on Shock-Wave/Boundary-Layer Interaction", J. Propul Power, Vol. 26, no. 5, pp. 1503-1508, 2010.
6. John, J. and Keith, T. "Gas Dynamic", 3<sup>rd</sup> Ed, Pearson, Flint, USA, 2006.
7. Giepmans, R.H.M., Schrijer, F.F.J. and Oudheusden, B.W. "Flow Control of an Oblique Shock Wave Reflection with Micro-Ramp Vortex Generators: Effects of Location and Size", Phys. Fluids, Vol. 26, no. 6, pp. 066101-16, 2014.
8. Udagawa, K., Kaminaga, S. and Asano, H. "MHD Boundary Layer Flow Acceleration Experiments", 37<sup>th</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 2006.
9. Zaidi, S.H., Smith, T., Macheret, S.O. and Miles, R.B. "Snowplow Surface Discharge in Magnetic Field for High Speed Boundary Layer Control", 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp. 1006, USA, 2006.
10. Kalra, C.S., Shneider, M.N. and Miles, R.B. "Numerical Study of Shockwave Induced Boundary Layer Separation Control Using Plasma Actuators", 46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp. 1095, USA, 2008.

تمرکز این تحقیق در محل برخورد موج شوک بر روی دیواره پایین، تشکیل حباب جدایش و موج شوک انعکاسی بود. جریان سیال مافوق صوت در ماخ ۳ و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه انجام شده در نرم افزار فلونت با راه اندازی ماژول MHD با حل همزمان معادلات ناویر استوکس و معادلات میدان مغناطیسی (معادلات ماکسول) صورت پذیرفت. مدل آشفتگی در نظر گرفته شده اسپالارت آلماراس بود که به همراه آن معادله انرژی و معادله نیروی لورنتس نیز در نظر گرفته شده است. شبکه محاسباتی توسط نرم افزار ansys-meshing تولید و سپس استقلال از شبکه نیز بررسی شده است.

در نهایت نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج مراجع [۲] و [۵] مقایسه شده اند که مقایسه نتایج نشان دهنده تطابق خوب چه از لحاظ مقادیر و چه از لحاظ کیفی و رفتار کلی جریان می باشد. وجه تمایز این مطالعه، شبیه سازی جریان در شرایط محیطی تقریباً مشابه با ورودی هوای موتور یک هواپیمای مافوق صوت است. این موضوع گرچه زمان محاسبات را افزایش داده و روش حل را حساس تر می کند، اما باعث می شود که شرایط شبیه سازی به شرایط واقعی و کاربردی نزدیک تر شده و تأثیرات سایر عوامل پیرامونی نیز در حل نظر گرفته شود. نتایج به دست آمده در تحلیل نمودار توزیع فشار روی دیواره و همچنین تحلیل خطوط جریان نشان می دهد که میدان مگنتوهیدرودینامیک می تواند اندازه حباب جدایش را ۴۰ درصد کوچک کند. نمودار پروفیل سرعت نیز این واقعیت را تأیید می کند. این نمودار نشان می دهد که با افزایش عدد هارتمن مومنتوم سیال و همچنین گرادیان سرعت نرمال سیال نزدیک به دیواره افزایش می یابد. در نتیجه ضخامت لایه لزج کاهش یافته و تقریباً به صفر می رسد. علاوه بر آن میدان مگنتوهیدرودینامیک می تواند زاویه شوک را کاهش داده که منجر به حرکت رو به جلو حباب جدایش تا حدود ۲ درصد طول کانال می شود.

موضوع قابل تأمل دیگر افزایش تنش برشی دیواره و در نتیجه افزایش ضریب اصطکاک پوسته ای است. لذا در استفاده از روش کنترل جریان MHD در مسائل موج شوک

13. Saito, S., Udagawa, K., Kawaguchi, K., Tomioka, S. and Yamasaki, H. "Boundary Layer Separation Control by MHD Interaction", 46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp. 1091, USA, 2008.
14. Kalra, C.S., Shneider, M.N. and Miles, R.B. "Numerical Study of Boundary Layer Separation Control Using Magnetohydrodynamic plasma Actuators", Phys. Fluids, Vol. 21, no. 10, pp. 106101. 2009.
15. Changbing, S., Yinghong, L., Bangqin, C., Jian, W., Jun, C. and Yiwen, L. "MHD Flow Control of Oblique Shock Waves Around Ramps in Low-temperature Supersonic Flows" Chinese J. Aeronaut, Vol. 23, no. 1, pp. 22-32, 2010.
11. Kalra, C., Zaidi, S.H., Alderman, B.J. and Miles, R.B. "Non-Thermal Control of Shock-Wave Induced Boundary Layer Separation Using Magneto-Hydrodynamics", 38<sup>th</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference In Uonjunction with the 16<sup>th</sup> International Conference on MHD Energy Conversion, pp. 4138, USA, 2007.
12. Kalra, C., Zaidi, S.H., Alderman B.J., Miles, R.B. and Murty, Y.V. "Magnetically Driven Surface Discharges for Shock-Wave Induced Boundary-Layer Separation Control", 45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp. 222, USA, 2007.