

# کنترل جریان سیال به وسیله عملگرهای مبتنی بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی

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

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه هوافضا

<sup>۲</sup> مربی، پژوهشگاه هوافضا

<sup>۳</sup> استادیار، پژوهشکده علوم و فنون هوایی، پژوهشگاه هوافضا

\*مسئول مکاتبات: taleghani@ari.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

کنترل جریان  
مگنتوهیدرودینامیک  
نیروی لورنتس  
کنترل شوک

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۲۳  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۲۸

در این مقاله ابتدا توضیح مختصری از مفهوم کنترل جریان سیال و نحوه دسته‌بندی روش‌های مختلف آن داده شده است. در ادامه دو دسته مهم از عملگرهای کنترل جریان مبتنی بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی معرفی و نحوه عملکرد آن‌ها توسط نیروی لورنتس توضیح داده شده است. دسته اول که به عملگرهای الکتروهیدرودینامیک مشهور هستند، صرفاً تحت تأثیر میدان الکتریکی عمل می‌کنند. این عملگرها با استفاده از تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا توسط الکترودهای هادی جریان الکتریکی، لایه نازکی از هوای گذرنده از روی عملگر را یونیزه کرده و سپس این لایه در حضور میدان الکتریکی شتاب می‌گیرد. دسته دوم که عملگرهای مگنتوهیدرودینامیک هستند، علاوه بر میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی نیز همزمان به جریان سیال اعمال می‌کنند. در ادامه کارایی عملگرهای مگنتوهیدرودینامیک در جریان‌های مافوق صوت بررسی و تأثیرات آن بر اصلاح زاویه شوک، کاهش جدایش و کنترل رشد لایه مرزی بررسی شده است.

## ۱ مقدمه

نظریه MHD یک نظریه شاره‌ای است که بر حسب پارامترهای ماکروسکوپی نظیر چگالی، فشار، دما، میدان سرعت شاره و میدان مغناطیسی آن بیان می‌شود. اصطلاح MHD نخستین بار توسط هانس آلفن<sup>۷</sup> بکار برده شد. به دلیل کارهایی که وی در همین زمینه انجام داد و همچنین معرفی امواج آلفن، جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۷۰ دریافت کرد. روش MHD کاربردهای متفاوتی دارد. به عنوان مثال از این روش برای تولید جریان الکتریکی [۴، ۵] یا شتابدهی جریان سیال در سیستم‌های تولید تراست [۶] استفاده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، یکی از کاربردهای مهم MHD استفاده از آن در کنترل جریان سیال است. یکی از مهمترین پارامترهایی که بر کارایی عملگرهای کنترل جریانی مبتنی بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تأثیر گذار است، میزان یونیزاسیون سیال عامل و کیفیت پلاسما است. لذا استفاده از این نوع عملگرهای کنترل جریان در شرایطی که جریان سیال حاوی ذرات پلاسمای بیشتری است، راندمان بالاتری دارد. در رژیم جریان مافوق صوت و ماورای صوت در نواحی تشکیل شوک به جهت شرایط دمایی پشت شوک سطح یونیزاسیون و تشکیل پلاسما افزایش می‌یابد. از این رو تحقیقات زیادی با هدف استفاده از این نوع عملگرها بر روی اجسام پرنده مافوق صوت و ماورای صوت انجام شده است [۷، ۸]. تحقیق در مورد پلاسما مغناطیسی که در پروازهای با ماخ بالا تولید می‌شود، در ابتدا بر روی کپسول‌های فضایی انجام شد. کپسول‌های فضایی که در سرعت‌های مافوق

اولین تلاش‌ها برای تشریح کمی نیروی الکترومغناطیسی در اواسط قرن ۱۸ انجام شد. در طی سال‌های بعد کارهای زیادی توسط افرادی چون کولن<sup>۱</sup>، آمپر<sup>۲</sup>، فارادی<sup>۳</sup> و ماکسول<sup>۴</sup> در این رابطه صورت گرفت. نهایتاً در ۱۸۹۲ هنریک لورنتس<sup>۵</sup> توانست معادلات ماکسول را در مقیاس میکروسکوپی با متوسط رابطه‌ای شامل میدان الکتریکی و مغناطیسی بیان کند.

دستیابی به روش‌های جدید برای کنترل جریان سیال یکی از دغدغه‌های همیشگی دانشمندان فعال در حوزه آبرودینامیک بوده است. کنترل جریان به طور کلی به عنوان راه حلی‌هایی برای تغییر ویژگی‌های میدان جریان سیال با هدف بهینه کردن رفتار میدان جریان در جهت خواسته‌های کاربر، تعریف می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر دو دسته مهم از عملگرهای کنترل جریانی مبتنی بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مورد توجه محققین علم آبرودینامیک قرار گرفته‌اند. اولین دسته از این عملگرها، عملگرهای الکتروهیدرودینامیک یا EHD هستند. علم EHD به مطالعه دینامیک سیالات رسانای الکتریکی مانند پلاسما، تحت تأثیر میدان الکتریکی می‌پردازد [۲]. دسته دوم، عملگرهای مبتنی بر علم مگنتوهیدرودینامیک<sup>۶</sup> یا MHD هستند. علم MHD به بررسی ویژگی‌های جریان سیال رسانای الکتریکی تحت تأثیر همزمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌پردازد [۳].

<sup>1</sup>Coulomb <sup>2</sup>Amper <sup>3</sup>Faraday <sup>4</sup>Maxwell <sup>5</sup>Hendrik Lorentz <sup>6</sup>magnetohydrodynamics <sup>7</sup>Hannes Alfvén

ال-هاک آنها را به دو صورت در نظر گرفته است:

۱. روش‌هایی که روی دیوار یا دور از آن اعمال می‌شود. 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 پارامترهای جریان تأثیر بگذارد. گرم و سرد کردن سطح نیز می‌تواند از طریق ایجاد گرادیان‌های دانسیته و ویسکوزیته روی جریان تأثیر گذار باشد.

در مقابل، روش‌هایی هستند که دور از دیوار (سطح) اعمال می‌شوند. بمباران کردن لایه‌های برشی از طریق امواج آکوستیک از بیرون سطح و شکست ادی‌های بزرگ بوسیله وسایلی که دور از دیواره‌اند، از جمله تکنیک‌های سودمند در این روش هستند.

۲. روش‌های فعال و غیرفعال. در روش غیرفعال مانند تولیدکننده‌های ورتکس، ریبلت‌ها و... نیاز به مصرف انرژی نیست. روش فعال که در مقابل روش غیرفعال قرار می‌گیرد روشی است که در آن، انرژی، جرم یا هر نیروی کمکی دیگر بین محیط و سیال مبادله می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به دمش و مکش، سطوح متحرک و... اشاره کرد. در مقایسه با روش کنترلی غیرفعال، روش‌های فعال به دلیل امکان تصحیح در شرایط مختلف، قابلیت کنترل رفتار و ویژگی‌های جریان را با کارایی بیشتری فراهم می‌کنند. به‌طور کلی کنترل جریان فعال به روش‌هایی از کنترل جریان اطلاق می‌شود که نیازمند مصرف انرژی هستند [۱۱]. عملگر می‌تواند روشن و خاموش شود و برخی مشخصه‌های عملی می‌توانند تنظیم شوند. کنترل فعال جریان یک زمینه چند موضوعی در حال توسعه روزافزون است که برای مکانیک سیالات، پژوهشگران را در زمینه‌هایی مثل ریاضی کاربردی، فیزیک و کنترل جذب خود نموده است. باید در نظر داشت که پاسخ‌های جریان سیال به هر یک از پدیده‌های که نتیجه این روش‌ها می‌باشند، در شرایط مختلف، متفاوت است. مورد بسیار مهمی که در استفاده از این روش‌ها باید در نظر داشت، تأثیر هریک از پدیده‌ها روی یکدیگر است. در شکل ۲ این تأثیرات مشخص شده است. عملگرهای کنترل جریانی که مبتنی بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی عمل می‌کنند، جزو روش‌های نزدیک دیواره تقسیم بندی می‌شوند. این عملگرها با یونیزاسیون جریان سیال گذرنده از روی عملگر آن را تبدیل به پلاسما کرده و سپس با اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، اهداف کنترل جریانی را برآورده می‌سازند.

### ۳ اصول حاکم بر کارکرد، عملگرهای کنترل جریانی الکتریکی و مغناطیسی

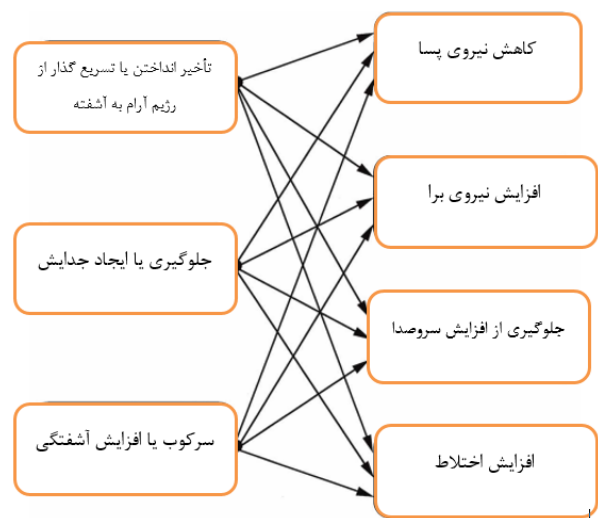
چهار معادله ماکسول به همراه اصل بقای بار الکتریکی (معادله پیوستگی) و معادله نیروی لورنتس، اساس نظریه الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند. از این معادلات می‌توان برای توضیح و پیش‌بینی تمام پدیده‌های ماکروسکوپی الکترومغناطیسی استفاده کرد [۱۲].

صوت و ماورای صوت حرکت می‌کنند، توسط لایه‌ای از سپر الکترومغناطیسی احاطه می‌شوند. این سپر الکترومغناطیسی نتیجه گذر هوا از شوک ایجاد شده بر روی بدنه کپسول است که باعث گرم شدن و یونیزه شدن هوا در پشت شوک می‌شود. در دهه ۱۹۶۰ با انجام آزمایش‌های اولیه تأثیر روش MHD بر روی شوک به وضوح مشخص شد [۹].

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای یونیزاسیون ارائه شده است که زمینه ساز استفاده از روش MHD و EHD در شرایط دمایی متنوع‌تر هستند. از جمله این روش‌ها اعمال تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا، اعمال امواج مغناطیسی فرکانس بالا و لیزر هستند. علاوه بر این‌ها تغییرات خواص دینامیکی به وسیله تشعشعات ماکروویو منجر به افزایش دمای گاز تا تولید پلاسما می‌شود. در مقایسه میان عملگرهای کنترل جریانی MHD و EHD، عملگرهای MHD بسیار بیشتر مورد توجه هستند [۱۰]. چرا که این دسته از عملگرها در اغلب موارد دارای بازدهی بالاتری هستند. در این مطالعه نیز ضمن معرفی کوتاهی از عملگرهای EHD، تمرکز بر معرفی عملگرهای MHD است. لذا سعی شده است نحوه استفاده از این دسته از عملگرها در شرایط مختلف بررسی و نتایج ارائه شود. همچنین پارامترهای مؤثر بر افزایش راندمان این روش کنترل جریانی در شرایط مختلف بیان شده است. از جمله مزیت‌های این روش راندمان مناسب و محدودیت‌های عملیاتی کمتر است.

## ۲ کنترل جریان

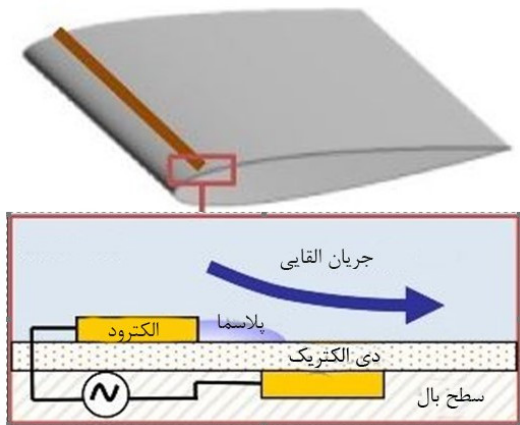
همان‌طور که گفته شد کنترل جریان به عنوان راه حلی‌هایی برای تغییر ویژگی‌های میدان جریان با هدف بهینه کردن رفتار میدان تعریف می‌شود. گد-ال-هاک [۱] اهداف کنترل جریان را شامل به تأخیر انداختن یا تسریع گذار از رژیم آرام به آشفته، جلوگیری یا ایجاد جدایش و سرکوب یا افزایش آشفستگی می‌داند. از جمله مزایای مهم کنترل جریان شامل کاهش نیروی پسا، افزایش نیروی برا، افزایش اختلاط و همچنین جلوگیری از افزایش سروصدا است. رابطه میان این اهداف و مزایا در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱: گراف رابطه میان اهداف و مزایای کنترل جریان [۱].

دسته‌بندی‌های مختلفی برای روش‌های کنترل جریان وجود دارد که گد-

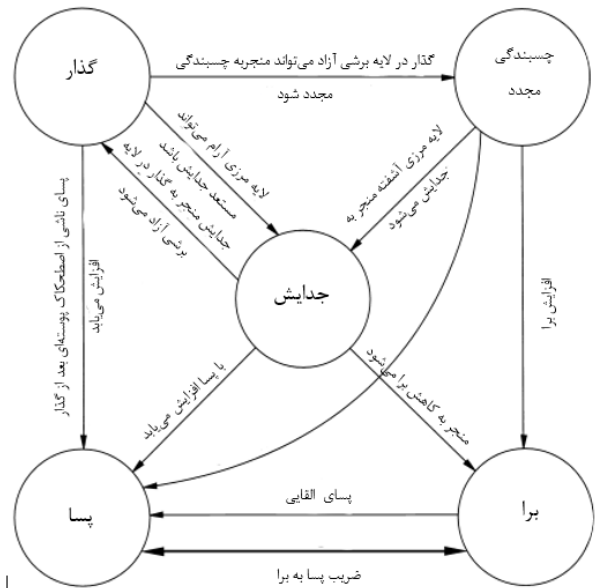
این عملگرها عموماً به نام محرک‌های پلاسمایی شناخته می‌شوند. می‌توان گفت اولین دسته از تکنیک‌های کنترل جریان فعال به وسیله پلاسما، با روش الکتروهیدرودینامیک (EHD) مورد بررسی و استفاده قرار گرفت. این محرک‌های پلاسمایی با استفاده از تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا توسط الکترودهای هادی جریان الکتریکی، لایه نازکی از هوای گذرنده از روی محرک را یونیزه می‌کنند. سپس این لایه در حضور میدان الکتریکی شتاب می‌گیرد. از لحاظ تئوری محرک‌های پلاسمایی می‌توانند با افزایش شتاب، ماخ لایه مرزی را تا ۱ افزایش دهند [۷]. بیشترین مطالعاتی که در زمینه کنترل جدایش جریان در ایرفویل‌ها به وسیله محرک‌های پلاسمایی انجام شده، با تمرکز بر روی قرارگیری محرک در لبه حمله بوده است. متداول‌ترین نوع محرک‌های پلاسمایی از نوع SDBD (شکل ۳) هستند که از دو الکتروود جداگانه تشکیل شده است. الکتروود پایینی در حفاظی از مواد دی‌الکتریک قرار دارد و الکتروود بالایی در تماس با جریان سیال قرار می‌گیرد. این محرک با تخلیه الکتریکی و شتاب دادن لایه مرزی در جهت سطح ایرفویل موجب به تأخیر انداختن جدایش جریان و در کل افزایش کارایی ایرفویل می‌شوند [۱۳].



شکل ۳: ایرفویل مجهز به محرک EHD در لبه حمله [۱۳].

مطالعات دیگری با انگیزه استفاد مؤثرتر از محرک‌های پلاسمایی در حال انجام است. در این روش که به عنوان یک تکنولوژی انقلابی در زمینه کنترل جریان محسوب می‌شود، از هیچ گونه سطوح کنترلی متحرکی استفاده نشده است و کنترل جریان با استفاده از ایرفویل‌هایی بهینه شده به وسیله محرک‌های پلاسمایی صورت می‌گیرد (شکل ۴). در این ایرفویل دارای برآمدگی، در لبه فرار سطح شیب‌داری وجود دارد که باعث جدایش جریان می‌شود و قبل از آن نیز محرک‌های پلاسمایی جایگذاری شده‌اند. عملکرد این محرک‌ها به گونه‌ای است که با کنترل جدایش جریان، نیروی برآ و یا پسای مورد نیاز در هر مرحله پروازی تأمین می‌شود. مطالعه بر روی این نوع از ایرفویل‌ها ابتدا بر روی پهنپاداها صورت پذیرفته است [۱۴].

همان‌طور که از ماهیت روش EHD (و همین‌طور MHD) مشخص است، نکته مهم در بکار بردن این روش رسانا بودن سیال عامل است. در سیال هوا خاصیت رسانایی به روش تولید پلاسمای محلی القا می‌شود و در موارد دیگر مانند آب دریا و آب اسیدی خود سیال خاصیت رسانایی دارد. مزیت اصلی محرک‌های پلاسمایی در واقع کارایی و نحوه عملکرد آنهاست، که برپایه کنترل پارامترهای الکتریکی جریان سیال بنا نهاده شده



شکل ۲: تأثیر هر یک از پدیده‌های فیزیکی جریان سیال بر روی یکدیگر [۱].

همان‌طور که اشاره شد عملگرهای کنترل جریانی مبتنی بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با تکیه بر نیروی لورنتس عمل می‌کنند. این نیرو اولین بار توسط دانشمند هلندی هنریک لورنتس شرح داده شد. وی اظهار داشت که نیروی الکترومغناطیسی کل وارد بر بار متحرک  $q$  برابر  $F = F_e + F_m$  است. در این معادله  $F_e$  بیان می‌کند که هرگاه بار آزمون کوچک  $q$  در میدان الکتریکی  $E$  قرار گیرد، نیروی الکتریکی  $F_e$  که تابعی از مکان  $q$  است، به آن وارد می‌شود، داریم:

$$\vec{F}_e = q\vec{E}. \quad (1)$$

در معادله لورنتس،  $F_m$  بیان کننده نیروی مغناطیسی وارد بر بار متحرک  $q$  است. اندازه این نیرو با بزرگی  $q$ ، سرعت ذره  $u$  و بزرگی میدان مغناطیسی  $B$  رابطه مستقیم دارد. لذا برای  $F_m$  داریم:

$$\vec{F}_m = q\vec{u} \times \vec{B}. \quad (2)$$

از این رو کل نیروی لورنتس وارد بر بار متحرک  $q$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}). \quad (3)$$

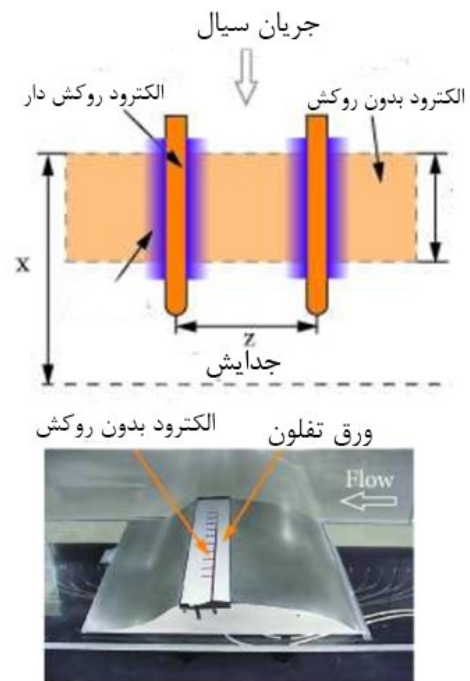
همان‌طور که اشاره شد، عملگرهای EHD مبتنی بر میدان الکتریکی عمل می‌کنند. لذا این عملگرها از بخش اول معادله لورنتس یعنی  $F_e$  پیروی می‌کنند. عملگرهای MHD با تکیه بر اعمال همزمان میدان الکتریکی و مغناطیسی عمل می‌کنند. لذا برای توصیف نحوه عملکرد روش MHD از هر دو بخش معادله لورنتس استفاده می‌شود.

### ۱.۳ عملگرهای مبتنی بر میدان الکتریکی (روش EHD)

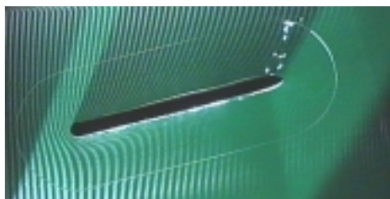
عملگرهای EHD یکی از روش‌های فعال در زمینه کنترل جریان هستند که با هدف به تعویق انداختن جدایش جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از این روش در لایه مرزی آشفته باعث کاهش تنش برشی روی سطح می‌شود. با هدف گسترش دامنه مطالعات، آزمایش‌های مختلفی در شرایط گوناگون طراحی شد. به عنوان مثال با به کارگیری این روش در شرایط رینولدز متفاوت، اعمال نوسانی نیروی الکترومغناطیسی، تعویض جهت جریان سیال (نیرو در جهت جریان و یا عمود بر جهت جریان) و... نحوه تغییر پارامترهای مؤثر در کنترل جریان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. به طور کلی نتایج حاصل از پتانسیل بالای این روش کنترل جریان در افزایش برآ، کاهش پسا کلی، افزایش مومنتوم سیال و کاهش ضریب فشار مثبت در جریان سیال دارد. در جریان این مطالعات مشخص شد که اگر از میدان مغناطیسی به اندازه کافی قوی استفاده شود، شدت آشفتگی، نوسانات سرعت و تنش‌های رینولدز می‌تواند به سرعت به صفر میل کند [۱۵]. همان طور که اشاره شد، جدایش جریان کارایی دستگاه‌های آیرودینامیکی را محدود می‌کند. طبق تئوری پراپرتل جدایش زمانی اتفاق می‌افتد که بر اثر نیروهای اصطکاکی انرژی جنبشی سیال کاسته شود. مطالعات تام وریر و همکاران [۱۶] بر روی صفحه تخت نشان داد که می‌توان با اعمال نیروی لورنتس به لایه مرزی انرژی جنبشی سیال که به سبب اصطکاک کاسته شده را جبران کرد و بدین ترتیب مانع از جدایش جریان شد. نحوه تأثیر این نیرو بر جدایش جریان روی صفحه تخت در شکل ۶ به وضوح مشخص است.

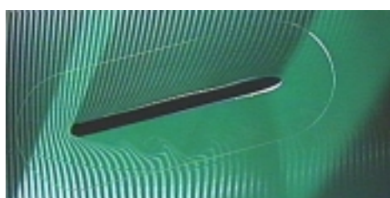
است. در مسائل هوافضایی این ویژگی ما را قادر می‌سازد تا با دریافت بازخوردها، از این روش به طور بهینه در کنترل توسعه اختلالات مختلف دینامیک گازی در جریان نزدیک سطح یک جسم آیرودینامیکی، استفاده کنیم.



شکل ۴: ایرفویل مجهز به محرک EHD [۱۴].



(الف)



(ب)

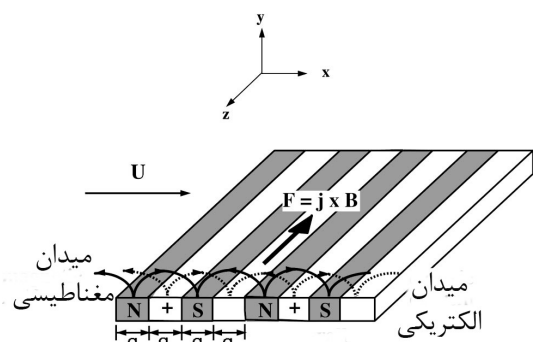
شکل ۶: تأثیر محرک MHD بر خطوط جریان [۱۷] (الف) در حضور میدان مغناطیسی، (ب) در غیاب میدان مغناطیسی

مطالعات با هدف استفاده بهینه از این روش ادامه یافت. نتایج نشان داد که در مواردی به کارگیری نیروهای الکترومغناطیسی به صورت نوسانی می‌تواند بهینه‌تر باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی اولیه‌ی شاتارو و گریت نشان داد که در صورت استفاده بهینه از این روش شاهد کاهش بیش از ۳۰٪ پسای پوسته‌ای خواهیم بود [۱۷].

در ادامه، مطالعات عددی مختلفی با هدف بررسی تأثیر الگوهای نوسانی متفاوت نیروهای الکترومغناطیسی انجام شد [۱۸]. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، با قرار دادن محرک الکترومغناطیسی در لبه حمله یک صفحه، نیروی لورنتس با استفاده از جریان الکتریکی به شکل نوسانی با الگوهای سینوسی و مربعی به جریان سیال رسانا اعمال شد و ویژگی جریان سیال در حالت‌های مختلف بررسی شد.

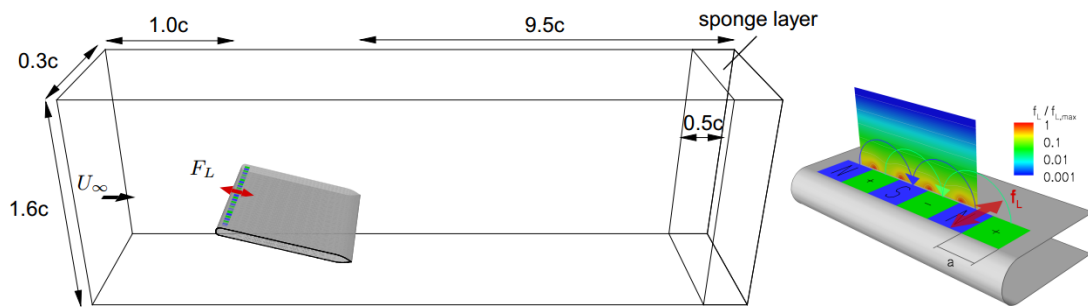
## ۲.۳ عملگرهای مبتنی بر اعمال همزمان میدان الکتریکی و مغناطیسی (روش MHD)

در روش MHD یونیزاسیون با مکانیزمی مشابه روش EHD صورت می‌گیرد با این تفاوت که علاوه بر میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی نیز همزمان به جریان سیال اعمال می‌شود. اعمال همزمان این دو میدان باعث القای نیروی حجمی لورنتس بر جریان سیال یونیزه شده می‌شود. شکل ۵ یک نمونه از محرک MHD را نشان می‌دهد که در آن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی کنار هم شرایط را برای اعمال نیروی لورنتس بر جریان سیال محیا می‌کنند.



شکل ۵: ساختار یک محرک MHD [۱۵].

آزمایش‌های اولیه با هدف کنترل گسترش ضخامت لایه مرزی آرام در جهت به تاخیر انداختن گذار به رژیم جریان آشفته انجام شد. تحقیقات با هدف گسترش استفاده از این روش در جریان‌های آشفته ادامه یافت.

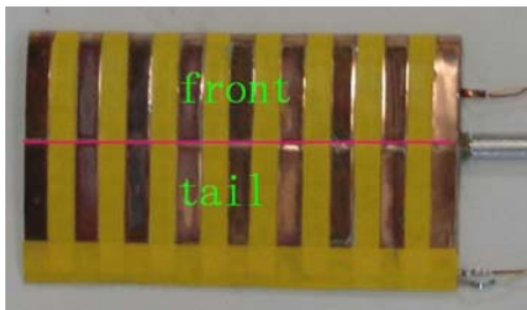


شکل ۷: شماتیک صفحه تخت مجهز به محرک MHD در تونل باد [۱۷].

لورنتس محیا می‌شود. این تحقیقات با هدف مطالعه تأثیر نیروی لورنتس بر افزایش برآ با بکارگیری سیال اسیدی به عنوان سیال عامل رسانا، طراحی و مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که با اعمال نیروی لورنتس در سطح بالایی ایرفویل، می‌توان به میزان قابل توجهی از جدایش جریان جلوگیری کرد. مکانیزم این روش، جلوگیری از افزایش ضخامت لایه مرزی است که منجر به تاخیر انداختن جدایش جریان و ممانعت از ایجاد گرادیان فشار معکوس و در نهایت باعث افزایش ضریب برآ و به طور کل افزایش کارایی ایرفویل می‌شود. البته میزان تأثیر روش MHD بر افزایش کارایی به پارامترهای متغیر آزمایش همچون خصوصیات میدان الکتریکی از جمله جریان، ولتاژ و خصوصیات جریان سیال مانند سرعت، چگالی و رسانایی سیال عامل بستگی دارد [۲۰، ۲۱].

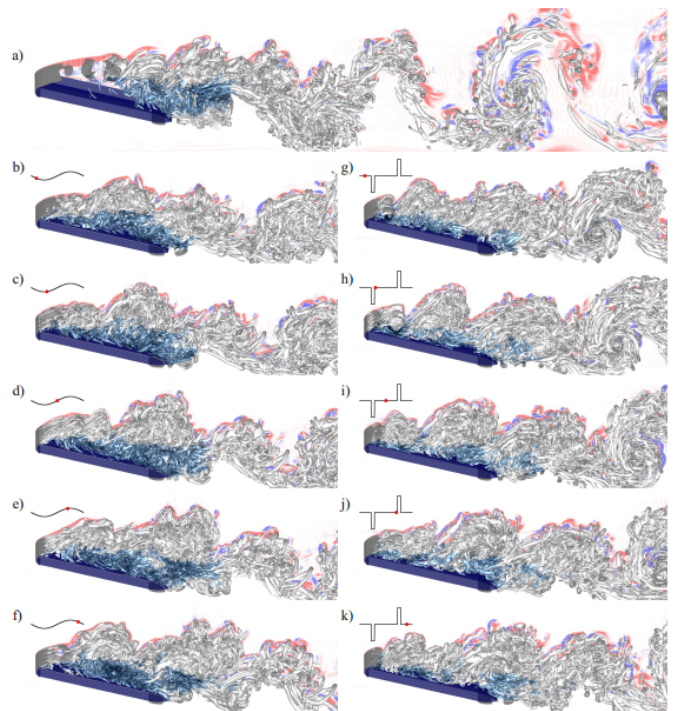
نتایج نشان داد که شکل نوسانات، تأثیر قابل توجهی بر ساختار و ویژگی‌های جریان سیال پشت صفحه دارد. بنابراین حداکثر برآ در محدوده خاصی از پارامترها متناسب با حداکثر مومنوم ورودی استخراج شد. کارهای عددی در رینولدز پایین ادامه یافت سپس مدل‌هایی در جریان آشفته شبیه‌سازی شد.

آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی روش MHD بر روی جریان‌هایی شامل ویژگی حالت گذار و آشفته نیز صورت پذیرفت. شکل ۷ شماتیک یک صفحه تخت با زاویه حمله معلوم و مجهز به محرک MHD در یک تونل باد با ابعاد مشخص را نشان می‌دهد. در شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی انجام شده برای نوساناتی به فرم سینوسی و مربعی با روش شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰، برای این صفحه تخت، آورده شده است [۱۷].



شکل ۹: نحوه چینش الکترودها بر روی ایرفویل [۲۰].

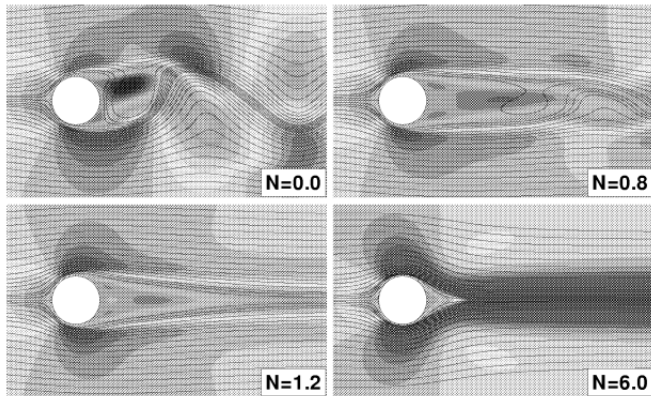
یکی از مواردی که بطور خاص در علم مکانیک سیالات در مورد آن مطالعه می‌شود، جریان حول اجسام منحنی شکل مانند استوانه است. در طی صد سال گذشته مطالعات تجربی و عددی متعددی با هدف کنترل جریان در اطراف اجسام منحنی شکل با هدف تأثیر گذاری بر نیروهای ایرودینامیکی مانند برآ و پسا و به تاخیر انداختن جدایش جریان صورت گرفته است. روش کنترل جریان MHD در این مورد خاص نیز نتایج مناسبی ارائه داده است. شکل ۱۰ مربوط به تحقیقاتی است که جریان اطراف سیلندر با اعداد رینولدز پایین تحت تأثیر نیروی الکترومغناطیسی لورنتس، در حالت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. با به کارگیری همزمان میدان الکتریکی و مغناطیسی توسط الکترودها، نیروی لورنتس به سطح سیلندر وارد می‌شود. نیروی لورنتس اعمالی به سیال عامل با فاصله گرفتن از دیوار به صورت نمایی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر بیشترین میزان نیرو به لایه مرزی وارد می‌شود. نیروی حجمی لورنتس با جلوگیری از رشد بیش از اندازه پروفیل



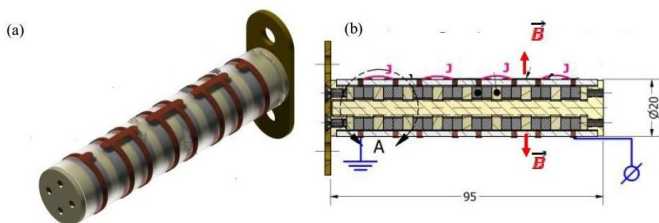
شکل ۸: تأثیر تحریک‌های سینوسی و مربعی بر جریان پشت ایرفویل [۱۹].

در شکل ۹ ایرفویلی مجهز به محرک MHD مشاهده می‌شود که در این محرک میدان مغناطیسی خود القا بوده و در واقع به خاطر نحوه چینش الکترودها میدان الکترومغناطیسی ایجاد شده و شرایط برای اعمال نیروی

قوس الکتریکی که توسط نیروی لورنتس در یک میدان مغناطیسی شعاعی در طول استوانه انجام می‌پذیرد، منجر به جذب جریان سیال در نزدیکی دیواره می‌شود. حضور این منبع گرمای چرخشی منجر به تفکیک متقارن جریان خارجی و ظهور نیروی برای غیر صفر و گردش خواهد شد [۲۳].



شکل ۱۱: جریان حول استوانه مجهز به محرک MHD [۲۲].



شکل ۱۲: استوانه مجهز به محرک MHD به همراه قوس الکتریکی [۲۳].

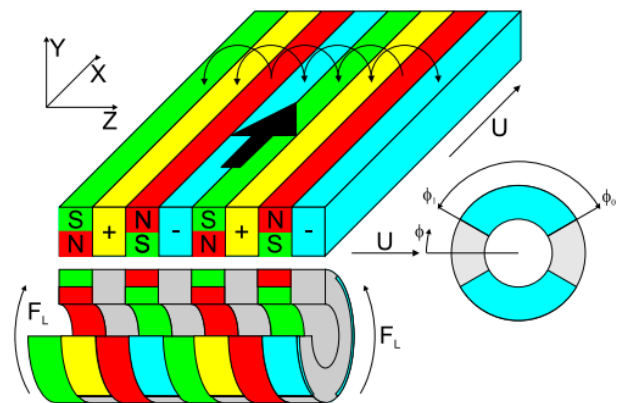
کارهای تحقیقاتی متعددی با تغییر پارامترهای مختلف در این زمینه انجام شده است. شبیه‌سازی عددی دیگری با هدف مطالعه MHD و تأثیر متقابل میدان مغناطیسی و رسانایی سیال بر پارامترهای جریان همچون سرعت و فشار با در نظر گرفتن سیال عامل متفاوت مانند پلاسما، آب اسیدی و آب نمک یا الکترولیت، ارایه شده است [۲۴].

### ۱.۲.۳ کنترل شوک به روش MHD

در سال ۱۹۶۷ با انجام آزمایش‌های اولیه، تأثیر نیروی لورنتس بر روی شوک‌های قایم و همچنین حذف شوک‌های مایل و کماتی به وضوح مشخص شد. بدین ترتیب برای اولین بار پیشنهادهایی در زمینه حذف پسای موجی و همچنین کنترل جریان بر روی بدنه اجسام پرنده در رژیم جریان مافوق صوت مطرح شد. در این آزمایش‌ها آب با خاصیت اسیدی (که رسانای جریان الکتریکی است) در کانالی به جریان در آمده و طبق شکل ۱۳ یک مدل استوانه‌ای از جنس مواد عایق که دو طرف آن دو الکتروده با زاویه ۱۸۰ درجه (از میانه) نسبت به هم قرار گرفته بودند، در میان جریان قرار گرفت.

در مرحله اول آزمایش‌های پتیت<sup>۸</sup> [۹] اثرات نیروی لورنتس بر روی سیال ساکن بررسی شد. همانطور که در شکل ۱۴ مشخص است با اتصال جریان الکتریکی مکش قوی در جلوی مدل ایجاد شد. بررسی‌های بیشتر، حکایت از این داشت که جریان ایجاد شده آرام و بدون هیچ گونه آشفتگی (عقبی) است.

سرعت باعث پایدارسازی جریان روی سیلندر شده بنابراین جدایی جریان به تعویق افتاده و پسای فشاری به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. از طرفی، با افزایش شتاب سیال در نزدیکی دیوار و ممانعت از جدایش جریان، پسای اصطکاکی افزایش می‌یابد. لذا این که در چه شرایطی این مکانیزم منجر به کاهش پسای کلی می‌شود، به شدت، موقعیت و شکل پروفیل نیروی لورنتس اعمالی وابسته است. این مهم توسط تغییر پارامترهای هندسی الکترودها و آهنرباها، صورت می‌گیرد. مکان مطلوب اعمال کنترل، منطبق بر ناحیه قبل و بعد از جدایش جریان است. لذا کاهش پسای کلی وابسته به عدد رینولدز و پارامترهای هندسی استوانه است [۲۲].



شکل ۱۰: محرک MHD بر روی استوانه [۲۲].

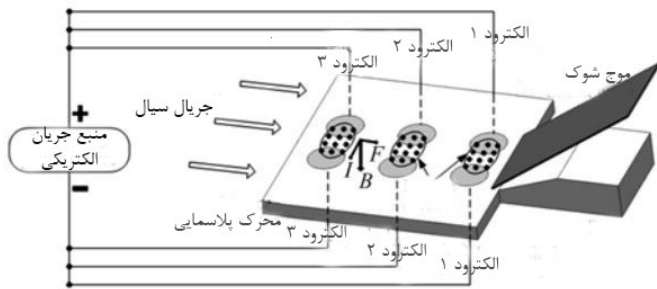
اما باید توجه داشت که از لحاظ فنی روش MHD پیچیدگی‌های خاص خود را دارد و آنچنان که در بعضی از گزارش‌ها آمده، ممکن است به علت شرایط خاص اعمالی، نتایج بدست آمده نامطلوب، ضعیف و از لحاظ فنی استفاده از این روش بی‌ارزش باشد. اما عمده‌ترین مشکل این روش پایین بودن کارایی انرژی آن است و دلیل اصلی نیز پایین بودن رسانایی سیال عامل است. به همین دلیل است که استفاده از این روش در کنترل جریان همچنان در مرحله تحقیقاتی جذاب بوده و برای ورود کامل به مرحله صنعتی در حال تکامل است. اما در بحث کارایی کنترل جریان به روش MHD یکی از پارامترهای مهم، پارامتر واکنشی  $N$  است. این پارامتر در واقع مشخص کننده رابطه بین نیروی الکترومغناطیسی حاصل از بزرگی میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و نیروی اینرسی جریان سیال است. این پارامتر با بزرگی میدان الکتریکی و اندازه میدان مغناطیسی رابطه مستقیم دارد. در شکل ۱۱ نحوه تغییر خطوط جریان سیال حول استوانه به ازای پارامتر واکنشی  $N$  متفاوت، مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که میدان MHD متناسب با پارامتر واکنشی  $M$  می‌تواند تأثیر بسزایی بر شکل خطوط جریان حول استوانه داشته باشد به طوری که به ازای  $N$  بزرگتر از ۱، گردابه‌های پشت استوانه به طور کامل حذف می‌شود. با افزایش  $N$  ناحیه جدایش کوچک‌تر شده و خطوط جریان به سطح استوانه نزدیک‌تر می‌شود [۲۲].

طی تحقیقات دیگری که در زمینه کنترل جریان حول استوانه با استفاده از روش MHD انجام شد، کنترل جریان به وسیله قوس الکتریکی چرخشی حول استوانه مجهز به محرک MHD انجام گرفت (شکل ۱۲). چرخش

<sup>۸</sup>Petit

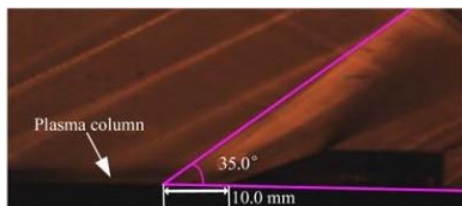
موارد این تغییرات نامطلوب بوده و سعی در کاهش قدرت شوک با استفاده از روش‌های کنترل جریان مختلف از جمله روش MHD می‌شود.

چنگ‌بینگ<sup>۹</sup> و همکاران [۲۵] طی آزمایش‌هایی به بررسی تجربی کنترل موج شوک با تکنیک MHD در امتداد رمپ در جریان مافوق صوت در دمای پایین پرداختند. این آزمایش‌ها نشان داد که روش MHD با تغییر خصوصیات جریان لایه مرزی حول رمپ می‌تواند موج شوک را تضعیف کند. در این آزمایش‌ها، ستون‌های پلاسما توسط تخلیه الکتریکی ولتاژ بالای جریان DC و میدان مغناطیسی به وسیله آهنربای ثابت ایجاد شدند. شوک مایل نیز در گذر جریان مافوق صوت از روی رمپ تشکیل می‌شود (شکل ۱۵).

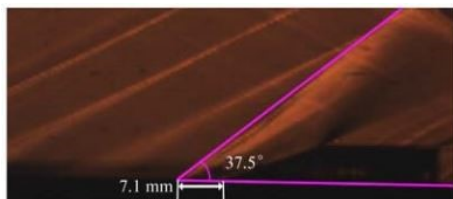


شکل ۱۵: آزمایش تجربی کنترل جریان به روش MHD بر روی شوک اطراف رمپ [۲۵].

جریان هوای یونیزه‌شده تحت تأثیر نیروی حجمی لورنتس که به وسیله اندرکنش میان پلاسما و میدان مغناطیسی به وجود می‌آید، قرار گرفت. این نیرو در جهت جریان پلاسما با هدف شتاب دادن به جریان یا در خلاف جهت جریان با هدف کاهش شتاب به جریان اعمال شد. نتایج حاکی از آن است که کارایی روش MHD در این آزمایش برای حالتی که نیرو در جهت جریان است، مناسب‌تر است. همچنین نتایج آزمایش تونل باد مافوق صوت نشان داد که کنترل جریان به روش MHD می‌تواند ویژگی‌های جریان اطراف رمپ را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. در این آزمایش‌ها، مشخص شد که با اعمال نیروی حجمی لورنتس، شوک به بالا دست جریان منتقل شده و زاویه شوک با سطح افق کاهش می‌یابد (شکل ۱۶).



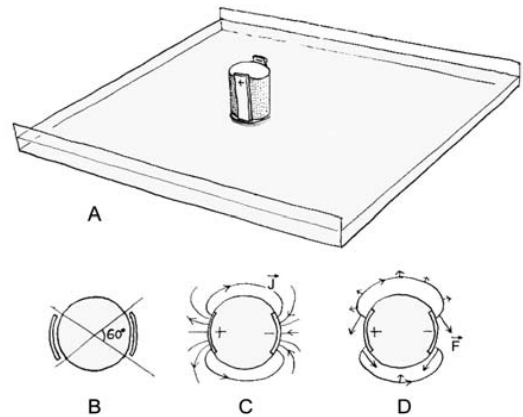
(الف)



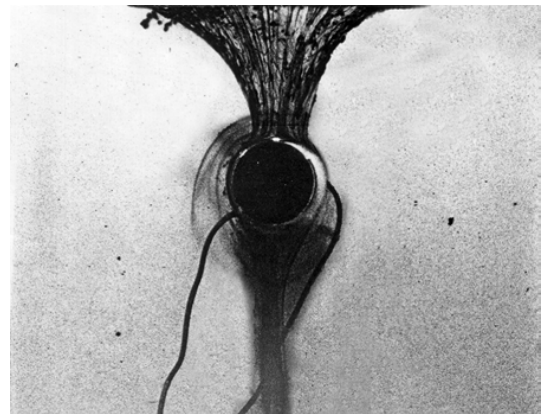
(ب)

شکل ۱۶: نحوه تأثیر محرک MHD بر شوک مایل ایجاد شده روی سطح شیب‌دار [۲۵]. (الف) زاویه شوک مایل در غیاب کنترل جریان MHD، (ب) زاویه شوک مایل در حضور کنترل جریان MHD.

البته در سمت راست شکل یک پارازیت گازی در اثر اکسیداسیون آندی قابل مشاهده است.



شکل ۱۳: استوانه مجهز به محرک MHD در جریان مافوق صوت [۹].



شکل ۱۴: مکش جریان توسط استوانه مجهز به محرک MHD [۹].

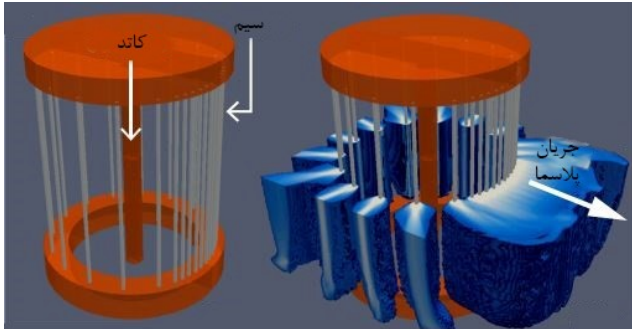
در مرحله بعدی آزمایش مشابهی انجام شد که این بار سیال با سرعت  $8 \text{ cm/s}$  بر روی سطح استوانه جریان داشت که می‌توانست  $1/4$  ماخ را شبیه سازی کند. با اعمال جریان الکتریکی تأثیر روش MHD و نیروی لورنتس در کاهش آشفستگی‌های عقبی به وضوح مشخص شد. تکرار این آزمایش‌ها در سرعت‌های مافوق صوت باعث از بین رفتن امواج ضربه‌ای، شوک کمانی و همچنین ایجاد ناحیه‌ای با خواص نقطه سکون در جلوی سیلندر شد.

تأثیر نیروهای لورنتس در روش MHD از طریق از بین بردن آشفستگی دنباله از یک سو و همچنین از بین بردن موج ضربه‌ای از سوی دیگر می‌تواند به کاهش محسوس اثرات حرارتی مربوط به محل تشکیل موج ضربه‌ای بر روی جسم منجر شود [۹].

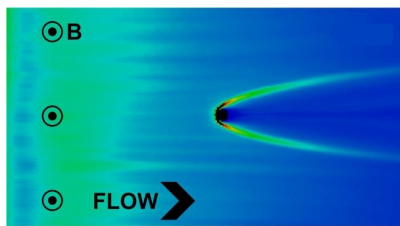
از سال ۱۹۷۰ تلاش‌هایی برای استخراج معادلات پشتیبان از این آزمایش‌ها انجام گرفت. در ابتدا لازم بود تشخیص داده شود که چه عاملی باعث تشکیل امواج ضربه‌ای در جریان سیال می‌شود. سپس می‌بایست طبق قوانین ناویر استوکس و معادلات ماکسول خصوصیات که با سیستم سیالاتی همراه است، مشخص شود. مسئله مهم در مورد شوک، تغییرات شدیدی است که در گذر از شوک ایجاد می‌شود. از جمله این تغییرات می‌توان به افزایش دما، کاهش ماخ، افزایش فشار، کاهش فشار سکون اشاره کرد. در بعضی

<sup>9</sup>Changbing <sup>10</sup>Lapushkina <sup>11</sup>Erofeev

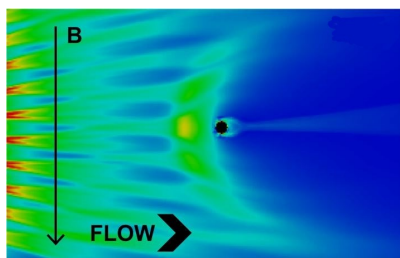
متفاوت را نشان می‌دهد. وجه تمایز این محرک نحوه چینش محرک‌ها و رسانا بودن خود بدنه محرک است. در این مطالعات میدان مغناطیسی از خارج به جریان الکتریکی گذرنده از میان محرک، به صورت نوسانی اعمال شده و با تغییر جهت و زاویه اعمال میدان مغناطیسی نسبت به مسیر جریان، نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها نیز نتایج حاکی از آن است که روش MHD تأثیر قابل توجهی بر ساختار شوک کمّانی ایجاد شده حول استوانه دارد. به طوری که با اعمال این روش، شوک کمّانی از استوانه دور شده و زاویه آن نیز بزرگ‌تر شده و در نتیجه موج شوک تضعیف می‌شود (شکل ۲۰).



شکل ۱۹: محرک MHD استوانه‌ای [۲۶].



(الف)

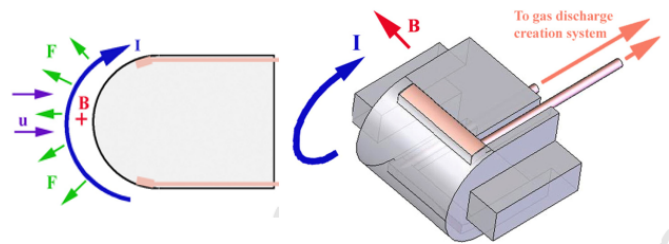


(ب)

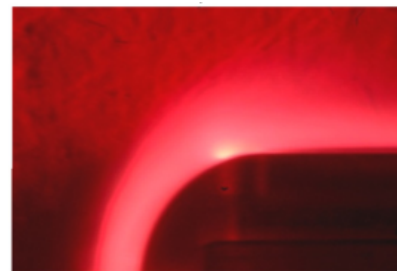
شکل ۲۰: نتایج به ازای اعمال میدان در جهت متفاوت [۲۷] (الف) میدان مغناطیسی از بغل به محرک وارد شده (ب) میدان مغناطیسی از بالا به محرک وارد شده

جدایش جریان ناشی از برخورد و انعکاس موج شوک یا SIFS یکی از مسائلی است که به طور خاص به آن پرداخته می‌شود. این پدیده در برخی موارد منجر به وقوع اتفاقات نامطلوب می‌شود. به عنوان مثال در موتورهای با تکنولوژی رمجت یا اسکرمجت، تشکیل موج‌های انعکاسی متوالی باعث جدایش‌های متعدد شده، که می‌توانند منجر به کاهش حجم و اختلال در جریان هوای ورودی به موتور شوند؛ که نتیجه آن کاهش و یا حتی از دست رفتن نیروی پیشران موتور است. به طور کلی می‌توان گفت میان نقطه شروع جدایش، ضخامت مومنتوم و فشار کاری محفظه احتراق رابطه‌ای منطقی وجود دارد.

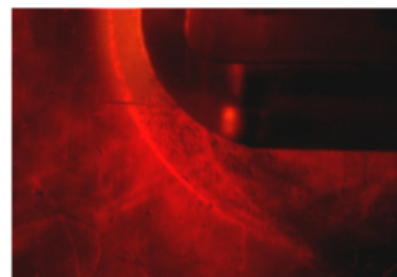
در مطالعات لاپوشکینا<sup>۱۰</sup> و اروفو<sup>۱۱</sup> [۳] با استفاده از تخلیه الکتریکی بر روی جریان در دماغه و نزدیک به سطح جسم نیمه استوانه‌ای، پلازما ایجاد شد و با اعمال میدان مغناطیسی، تأثیرات آن بر روی شوک کمّانی مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱۷). در این مطالعات برای کنترل جریان به روش MHD پارامتر واکنشی ST معرفی شد و مشخص شده که با تغییر بزرگی این پارامتر و همچنین تغییر جهت اعمال نیروی لورنتس، شوک کمّانی ممکن است به دماغه نزدیک یا از آن دور شود. در این مطالعات نتایج روش MHD با روش EHD مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که روش MHD تأثیر بیشتری در دور کردن شوک کمّانی و کاهش اثرات آن دارد (شکل ۱۸).



شکل ۱۷: جایگذاری محرک MHD بر روی جسم نیمه استوانه‌ای [۳].



(الف)

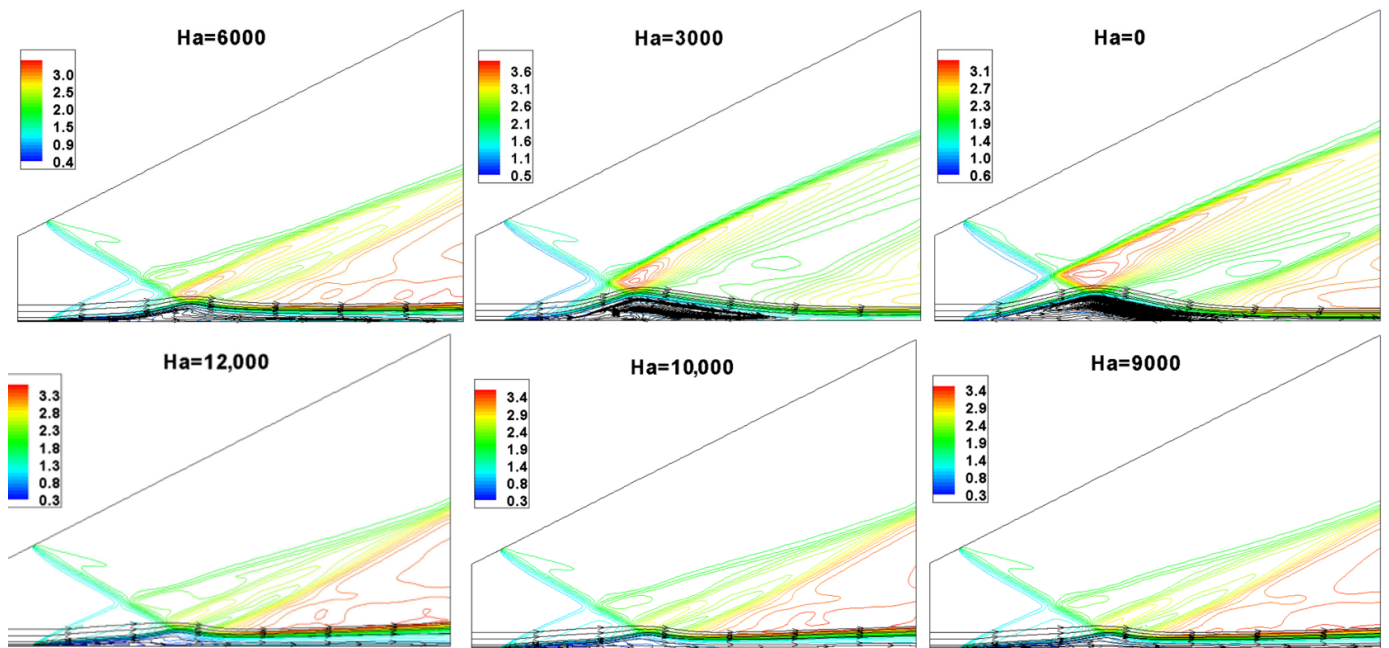


(ب)

شکل ۱۸: تأثیر محرک MHD بر روی ساختار شوک روی جسم نیمه استوانه‌ای [۳] (الف) ساختار شوک در حضور میدان الکتریکی و مغناطیسی؛ (ب) ساختار شوک درغیاب میدان الکتریکی و مغناطیسی

در سال‌های اخیر روش کنترل جریان MHD به خصوص در رژیم جریان مافوق صوت و ماورای صوت برای محققان جذابیت زیادی پیدا کرده و مطالعات عددی و تجربی بسیار گسترده‌ای انجام گرفته است. مهم‌ترین چالش شبیه‌سازی‌های عددی، ارائه حل‌های بازه گسترده‌ای از جریان‌های آشفتنه است که بتواند به طور هم‌زمان مسائل شوک را نیز در نظر بگیرد و نتایجی با دقت و وضوح بالا ارائه دهد [۲۶]. در زمینه کارهای تجربی نیز با در نظر گرفتن شرایط مختلف و همچنین ابتکار در شکل ظاهری محرک‌ها تحقیقات فراوانی انجام گرفته است. شکل ۱۹ محرک استوانه‌ای شکل، با ساختاری





شکل ۲۱: خطوط جریان به ازای اعداد هارتمن (Ha) متفاوت [۲۸].

عملکرد این عملگرها بدین گونه است که لایه نازکی از هوای روی سطح جسم را تبدیل به پلاسما کرده و با اعمال نیروی لورنتس این لایه شتاب داده می‌شود. در واقع نیروی لورنتس اعمالی با جبران انرژی جنبشی سیال، که به دلیل اصطکاک کاهش یافته، جدایش جریان را به تاخیر انداخته و کارایی دستگاه‌های آیرودینامیکی را افزایش می‌دهند. نتایج استفاده بهینه از عملگرهای کنترل جریانی الکتریکی و مغناطیسی بر روی ایرفویل نشان از افزایش ضریب برآ، کاهش پسای کلی و در نتیجه افزایش راندمان ایرفویل دارند. در جریان‌های مافوق صوت و ماورای صوت به علت تشکیل پدیده شوک و دمای بالای پشت شوک یونیزاسیون بیشتری اتفاق افتاده و رسانایی جریان سیال افزایش می‌یابد. از این رو استفاده از عملگرهای کنترل جریانی MHD در جریان‌های با ماخ بالا راندمان بالاتری دارد. همین امر باعث شده که در سال‌های اخیر مطالعات تجربی و عددی گسترده‌ای در رژیم جریان مافوق صوت و ماورای صوت انجام شود. نتایج مطالعات نیز تأثیر قابل توجه این روش بر اصلاح زاویه موج شوک و بهبود اثرات ناخواسته پدیده شوک مانند کاهش جدایش ناشی از موج شوک انعکاسی را نشان می‌دهد.

## مراجع

- [1] Gad-el Hak, Mohamed. *Flow control: passive, active, and reactive flow management*. Cambridge university press, 2006.
- [2] Sosa, Roberto, Moreau, Eric, Touchard, Gérard, and Artana, Guillermo. Stall control at high angle of attack with periodically excited ehd actuators. in *35th AIAA Plasma-dynamics and Lasers Conference*, p. 2738, 2004.
- [3] Lapushkina, TA and Erofeev, AV. Supersonic flow control via plasma, electric and magnetic impacts. *Aerospace Science and Technology*, 69:313-320, 2017.

[۴] پورجعفرقلی، زاده، شیخ، قنبرعلی، و مداحیان. شبیه‌سازی عددی اثر هندسه و

لذا با کنترل ضخامت مومنتوم و نقطه شروع جدایش در موتورهای اسکرمجت می‌توان حداکثر فشار کاری موتور را افزایش داد. این به معنای آن است که می‌توان سوخت بیشتری به موتور تزریق و در نتیجه نیروی پیشران بیشتری از آن دریافت کرد [۲۹]. بالاسوبرمن و همکاران [۲۸] با انجام مطالعات عددی تأثیر میدان MHD بر جدایش موج شوک انعکاسی را بررسی کردند. در این مطالعه مشخص شد که میدان MHD می‌تواند تأثیر بسزایی بر خطوط جریان داشته باشد به طوری که با افزایش عدد هارتمن، حباب جدایش رفته‌رفته کوچک‌تر شده و خطوط جریان به دیواره نزدیک‌تر می‌شوند (شکل ۲۱).

## ۴ نتیجه‌گیری

با وجود آن که بیش از نیم قرن است که از شروع مطالعات در زمینه کنترل جریان به روش‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌گذرد اما همچنان این روش‌ها ناشناخته‌های فراوانی داشته و پتانسیل بالایی جهت انجام تحقیقات بیشتر دارند. در این مقاله سعی شده کاربردهای مختلف این روش در زمینه کنترل جریان معرفی شود و توضیحاتی نیز در مورد مکانیزم عملکرد این روش گفته شده است.

دسته بندی‌های مختلفی برای روش‌های کنترل جریان وجود دارد. دو دسته‌بندی متداول براساس روش‌های دور از دیواره یا نزدیک دیواره و روش‌های فعال یا غیرفعال است. روش‌های مبتنی بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، جزو روش‌های فعال و نزدیک دیواره محسوب می‌شود.

در این مطالعه عملگرهای کنترل جریانی مبتنی بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به دو دسته کلی EHD و MHD تقسیم‌بندی شده‌اند. عملگرهای EHD از خصوصیات میدان الکتریکی و عملگرهای MHD از خصوصیات میدان الکتریکی و مغناطیسی به طور همزمان استفاده می‌کنند. مکانیزم اصلی

- [19] Albrecht, Thomas, Weier, Tom, Gerbeth, Gunter, Metzkes, Hans, and Stiller, Jörg. Numerical and experimental investigation of electromagnetic separation control using different wave forms. in *5th Flow Control Conference*, p. 4709, 2010.
- [20] Chen, Yaohui, Fan, Baochun, Chen, Zhihua, and Li, Hongzhi. Influences of lorentz force on the hydrofoil lift. *Acta Mechanica Sinica*, 25(5):589-595, 2009.
- [21] Moralev, Ivan, Bityurin, Valentin A, Klimov, Anatoly, and Kazanskiy, Pavel. Active flow control by means of MHD plasma actuator on a NACA 23012 airfoil model. in *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, p. 0310, 2015.
- [22] Posdziech, Oliver and Grundmann, Roger. Electromagnetic control of seawater flow around circular cylinders. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 20(2):255-274, 2001.
- [23] Munhoz, D, Zavershinskii, IP, Klimov, AI, Molevich, NE, Moralev, IA, Polyakov, LA, Porfiriev, DP, and Sugak, SS. Air flow control around the cylindrical rotating model by means of rotating electric arc in an external magnetic field. *Procedia Engineering*, 176:675-680, 2017.
- [24] Anderson, John David. Modern compressible flow: With historical perspective (mcgraw-hill series in mechanical engineering). 1982. in Persian.
- [25] Changbing, Su, Yinghong, Li, Bangqin, Cheng, Jian, Wang, Jun, Cao, and Yiwen, Li. MHD flow control of oblique shock waves around ramps in low-temperature supersonic flows. *Chinese journal of aeronautics*, 23(1):22-32, 2010.
- [26] Lin, Yurui, Zhang, Huali, and Zhou, Yi. Global smooth solutions of MHD equations with large data. *Journal of Differential Equations*, 261(1):102-112, 2016.
- [27] Burdiak, GC, Lebedev, SV, Bland, SN, Clayson, T, Hare, J, Suttle, L, Suzuki-Vidal, F, Garcia, DC, Chittenden, JP, Bott-Suzuki, S, et al. The structure of bow shocks formed by the interaction of pulsed-power driven magnetised plasma flows with conducting obstacles. *Physics of Plasmas*, 24(7):072713, 2017.
- [28] Balasubramanian, R, Anandhanarayanan, K, Krishnamurthy, R, and Chakraborty, Debasis. Mitigation of shock-induced flow separation using magnetohydrodynamic flow control. *Sādhanā*, 42(3):379-390, 2017.
- [29] Su, Wei-Yi, Chang, Xin-Yu, and Zhang, Kun-Yuan. Effects of magnetohydrodynamic interaction-zone position on shock-wave/boundary-layer interaction. *Journal of Propulsion and Power*, 26(5):1053-1058, 2010.
- [5] Afonin, Anton G, Butov, Vladimir G, Sinyaev, Sergey V, Solonenko, Viktor A, Shvetsov, Gennady A, and Stankevich, Sergey V. Rail electromagnetic launchers powered by pulsed MHD generators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45(7):1208-1212, 2017.
- [6] Sasaki, Yusuke, Takeshita, Shinji, Sasaki, Toru, Kikuchi, Takashi, Aso, Tsukasa, Harada, Makoto, and Harada, Nob. Numerical analysis of acceleration obtained from pulsed-linear-MHD accelerator using model rocket engine. *Plasma and Fusion Research*, 9:1206001-1206001, 2014.
- [7] Balasubramanian, R, Anandhanarayanan, K, Krishnamurthy, R, and Chakraborty, Debasis. Magnetohydrodynamic flow control of a hypersonic cruise vehicle based on AJAX concept. *Journal of Spacecraft and Rockets*, pp. 759-762, 2016.
- [8] Reddy, Dhanireddy R and Blankson, Isaiah. Emerging air-breathing propulsion technologies. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 2010.
- [9] Petit, Jean-Pierre, Geffray, Julien, and David, Fabrice. MHD hypersonic flow control for aerospace applications. in *16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, p. 7348, 2009.
- [10] Roth, J Reece and Dai, Xin. Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device. in *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 1203, 2006.
- [11] Joslin, Ronald D and Miller, Daniel N. *Fundamentals and applications of modern flow control*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [12] Cheng, David Keun et al. *Field and wave electromagnetics*. Pearson Education India, 1989.
- [13] Salmasi, Atefeh, Shadaram, Abdollah, and Taleghani, Arash Shams. Effect of plasma actuator placement on the airfoil efficiency at poststall angles of attack. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(10):3079-3085, 2013.
- [14] He, Chuan, Corke, Thomas, and Patel, Mehul. Numerical and experimental analysis of plasma flow control over a hump model. in *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 935, 2007.
- [15] Lee, Donghoon and Choi, Haecheon. Magnetohydrodynamic turbulent flow in a channel at low magnetic reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 439:367-394, 2001.
- [16] Weier, Tom, Gerbeth, Gunther, Mutschke, Gerd, Lielausis, Olgerts, and Lammers, Gerd. Control of flow separation using electromagnetic forces. *Flow, Turbulence and Combustion*, 71(1-4):5-17, 2003.
- [17] Shatrov, V and Gerbeth, G. Magnetohydrodynamic drag reduction and its efficiency. *Physics of Fluids*, 19(3):035109, 2007.
- [18] Cierpka, Christian, Weier, Tom, and Gerbeth, Gunter. Electromagnetic control of separated flows using periodic excitation with different wave forms. in *Active Flow Control*, pp. 27-41. Springer, 2007.