

بررسی کاربرد روش مگنتوهیدرودینامیک در سیستم‌های تولید تراست

احمد قنبری مطلق^۱، سهیلا عبدالهی پور^۲، سید آرش سید شمس طالقانی^۳ و*

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران

^۲مریی پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران

^۳استادیار پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران

*مسئول مکاتبات: taleghani@ari.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

MHD
پیشرانه
شتاب‌دهنده
نیروی لورنتز

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۹/۱۹
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

در طی سال‌های اخیر علم مگنتوهیدرودینامیک یا به اختصار MHD (Magneto-Hydro-Dynamic) به عنوان شاخه‌ای نوین از علوم بین رشته‌ای، مورد توجه محققین صنایع مختلف از جمله صنعت هوافضا قرار گرفته است. از این رو دستگاه‌های مختلفی همچون سیستم‌های تولید تراست، مبتنی بر این علم و با تکیه بر نیروی الکترومغناطیس، طراحی و ساخته شده‌اند. اگرچه سیستم‌های تولید تراست MHD می‌توانند به عنوان پیشرانه‌ای مستقل عمل کنند، اما در بعضی موارد نیز به عنوان راه حلی برای افزایش کارایی پیشرانه‌های شیمیایی پیشنهاد می‌شوند. آنها معمولاً در این موارد به نام شتاب‌دهنده MHD شناخته می‌شوند. این دسته از سیستم‌های تولید تراست علاوه بر ضربه ویژه مناسب، دارای بازه مطلوبی از تراست نیز می‌باشند. در این مطالعه ابتدا مزیت این دسته از سیستم‌های تولید تراست بیان می‌شود. در ادامه روش‌های تولید پلازما، که سیال عامل این سیستم‌ها می‌باشد، توضیح داده شده و همچنین اساس کار و نحوه تولید تراست در این سیستم‌ها بیان می‌شود. سپس انواع این سیستم‌ها دسته‌بندی و تمایز بین آنها توضیح داده شده است. در این مقاله دسته بندی کلی براساس استفاده و یا عدم استفاده از الکتروود صورت گرفته است و سایر ویژگی‌ها از جمله ساختار و نوع میدان مغناطیسی ذیل این دسته بندی معرفی شده‌اند.

۱ مقدمه

نظریه MHD یک نظریه شماره‌ای است که به توصیف رفتار پلازما یا به طور کلی هر سیال هادی الکتریکی در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌پردازد و این رفتار را بر حسب پارامترهای ماکروسکوپی نظیر چگالی، فشار، دما و سرعت گزارش می‌دهد. اصطلاح MHD نخستین بار توسط هانس آلفن به کار برده شد. وی به عنوان پیشگام این علم یک تقریب ریاضی برای محاسبه حرکت ذره باردار در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ارائه داد. آلفن به خاطر تلاش‌های ارزشمندش در زمینه گسترش فیزیک پلازما، جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۷۰ دریافت کرد [۱]. سیستم‌های تولید تراست MHD به عنوان یک گزینه مطلوب جهت بکارگیری در طیف گسترده‌ای از ماموریت‌های هوافضایی مطرح می‌شوند. این دسته از سیستم‌های تولید تراست با تکیه بر نیروهای الکترومغناطیسی و بر پایه قانون لورنتز طراحی و ساخته می‌شوند. سیستم‌های تولید تراست MHD با شتاب دادن سیال عامل، تراست تولید می‌کنند. در بعضی موارد این سیستم‌ها، به عنوان پیشرانه‌هایی مستقل عمل می‌کنند. از جمله پیشرانه‌های موفق ساخته شده بر پایه سیستم‌های تولید تراست MHD، می‌توان از مواردی چون پیشرانه مگنتوپلاسمایی^۱، پیشرانه هلیکونی^۲ و پیشرانه راکت مگنتوپلاسمایی با ضربه ویژه متغیر واسمیر^۳ نام برد [۲]. شکل ۱ مدل عملیاتی پیشرانه واسمیر ساخته شده توسط ناسا را نشان می‌دهد.



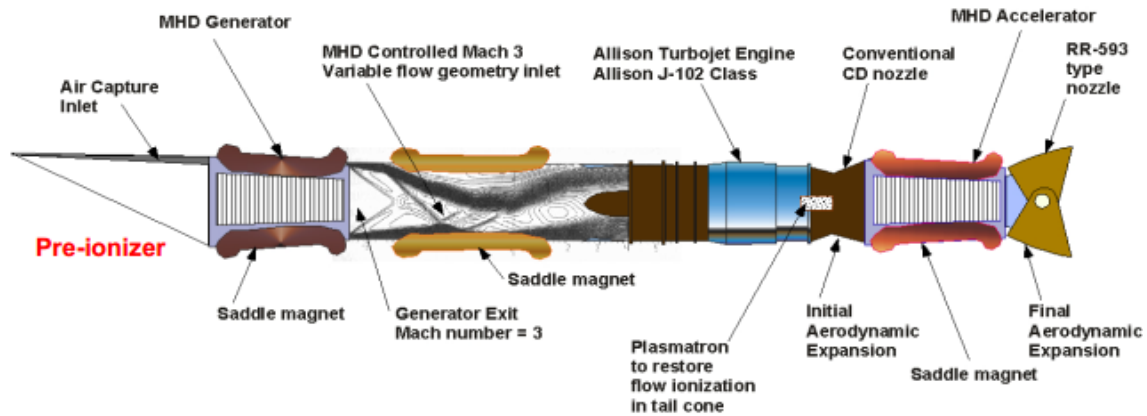
شکل ۱: نمونه عملیاتی پیشرانه واسمیر ساخته شده توسط ناسا [۵]

دسته‌ای دیگر از سیستم‌های تولید تراست، نوع MHD هستند که به عنوان سیستمی الحاقی به پیشرانه‌های شیمیایی اضافه می‌شوند. لذا معمولاً این دسته به عنوان شتاب‌دهنده‌های MHD شناخته می‌شوند. شکل ۲ یک موتور توربوجت را نشان می‌دهد که در قسمت پایین دست به شتاب‌دهنده MHD مجهز شده است [۳]. استفاده از شتاب‌دهنده‌های MHD در سرعت‌های بالا با کارایی بیشتری همراه خواهد بود.

¹Magneto-Plasma-Dynamic

²High Power Helicon Thruster

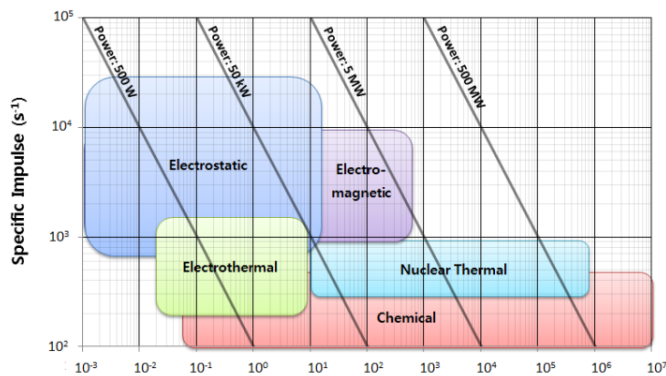
³Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket



شکل ۲: طرح مفهومی موتور توربو جت مجهز به شتاب دهنده MHD [۳]

بازه مطلوبی از تراست (تراست کم تا تراست نسبتاً زیاد) نیز می‌باشند. لذا سیستم‌های تولید تراست MHD قابلیت به کارگیری در انواع ماموریت‌هایی هوافضایی را دارند. البته تلاش‌ها برای نائل شدن به این هدف هنوز در مراحل تحقیقاتی می‌باشد و نیازمند مطالعات و بررسی‌های گسترده‌تری است. شکل ۳ مقایسه‌ای مطلوب از ضربه ویژه، سطح تراست و قدرت انواع سیستم‌های پیشران را ارائه داده است.

در این مقاله سعی شده ابتدا در مورد انواع روش‌های متداول تولید پلاسما در سیستم‌های تولید تراست MHD توضیح مختصری داده شود، سپس با بیان نحوه تعامل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی اصول عملکرد این نوع از سیستم‌های تولید تراست توضیح داده شود. در ادامه با دسته‌بندی انواع سیستم‌های تولید تراست MHD، تمایز آنها بیان شده است.



شکل ۳: ضربه ویژه، سطح تراست و قدرت سیستم‌های تولید تراست مختلف [۶]

۲ یونیزاسیون و تولید پلاسما

در سیستم‌های تولید تراست MHD از سیالی با خاصیت رسانای الکتریکی بالا مانند پلاسما یا گاز یونیزه شده به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. خاصیت رسانایی به روش‌های مختلفی در یک گاز القا می‌شود. یکی از روش‌های معمول تولید پلاسما، افزایش دمای گاز است. تولید پلاسما در دمای پایین نیز امکان‌پذیر است. یکی از روش‌های مرسوم تولید پلاسما دما پایین، دانه دهی یا بذریابی می‌باشد. در این روش مقدار کمی فلز قلیایی به عنوان ماده بذریونیزه کننده مانند سزیم، کربنات پتاسیم یا سدیم به درون گاز عامل مادر تزریق می‌شود. تولید پلاسما به روش‌های مختلف دیگری از

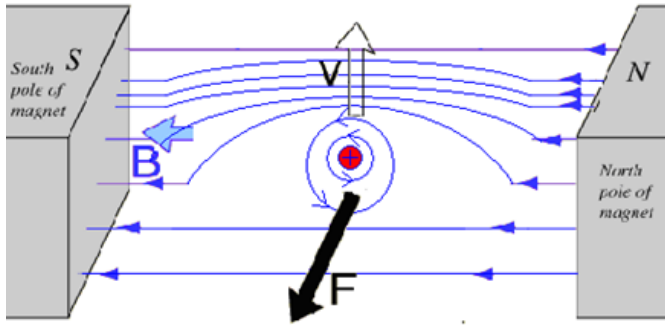
وسایل نقلیه ماوراءصوت به عنوان نسل بعدی و کلاس متفاوتی از وسایل نقلیه پروازی جهت بکارگیری در انواع ماموریت‌های هوافضایی مطرح می‌شوند. این دسته از وسایل نقلیه مجهز به مجموعه‌ای از سیستم‌های پیشرفته مبتنی بر علم MHD خواهند بود. در طراحی مفهومی هواپیماهای ماوراء صوت هدایت شونده، همچون AJAX، استفاده از شتاب‌دهنده‌های MHD به عنوان سیستم تقویت نیروی پیشران پیشنهاد شده است [۴].

از لحاظ سیال عامل کاری سیستم‌های تولید تراست MHD جزو سیستم‌های پلاسمایی محسوب می‌شوند. از طرفی این دسته از سیستم‌های تولید تراست، جهت دستیابی به کارایی مناسب، نیازمند منبع توان الکتریکی با چگالی انرژی بالا هستند. لذا جزو پیشران‌های الکتریکی نیز محسوب می‌شوند؛ اما باید بین سیستم‌های تولید تراست MHD که بر پایه اعمال همزمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و با تکیه بر نیروی لورنتز عمل می‌کنند و سیستم‌های تولید تراست الکترواستاتیکی که فقط با تکیه بر ویژگی‌های میدان الکتریکی عمل می‌کنند، تمایز قائل شد. لذا در طبقه بندی دقیق‌تر، سیستم‌های تولید تراست MHD جزو سیستم‌های الکترومغناطیسی دسته بندی می‌شوند [۶]. مشکل اساسی نمونه الکترواستاتیکی، تراست پایین آنهاست؛ لذا استفاده از آنها برای ماموریت‌های مانند خروج از جو که نیاز به تراست بالا دارند، مناسب نمی‌باشد. مزیت سیستم‌های الکترواستاتیکی، ضربه ویژه بالای آنهاست. لذا از آنها به عنوان سیستم پیشران سفرهای بین سیاره‌ای که نیازمند تراست پایین و ضربه ویژه بالا هستند، استفاده می‌شود. در مقابل، سیستم‌های پیشران شیمیایی مرسوم، همچون پیشران‌های سوخت جامد و سوخت مایع دارای تراست بالایی هستند. این تراست بالا ناشی از توانایی بالقوه زیاد آنها برای تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به انرژی حرارتی و سپس انرژی جنبشی است که اساساً متناسب با آهنگ بالای جریان جرمی در آنها است. بازده پیشران‌های شیمیایی، توسط ضربه ویژه آنها محدود می‌شود. این محدودیت ناشی از ظرفیت انرژی در واحد جرم سوخت‌های شیمیایی است. با این وجود حتی اگر بتوان سوختی با ظرفیت انرژی بالا در مقیاس صنعتی تولید کرد، محدودیت دمایی مواد و قطعات موجود مانع استفاده آن می‌شود [۷]. محدودیت ضربه ویژه مانع بکارگیری پیشران‌های شیمیایی در ماموریت‌هایی طولانی مدت همچون سفرهای بین سیاره‌ای می‌شود. سیستم‌های تولید تراست MHD علاوه بر ضربه ویژه مناسب دارای

¹Radio Frequency

را نشان می‌دهد. این نیرو به نیروی لورنتز مشهور بوده و جهت آن نیز توسط قانون دست راست مشخص می‌شود.

در یک شتاب دهنده MHD، پلاسما در یک کانال تحت تاثیر میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی طبق قانون لورنتز شتاب می‌گیرد. در بعضی موارد گاز ورودی به شتاب‌دهنده از قبل یونیزه می‌شود و در مواردی نیز گاز ضمن ورود به کانال یونیزه می‌شود.



شکل ۶: نیروی وارده بر یک ذره باردار در حضور میدان مغناطیسی [۱۰]

۴ دسته بندی سیستم‌های تولید تراست MHD

با توجه به مطالعات انجام شده، معیارهای مختلفی می‌توان برای دسته بندی سیستم‌های تولید تراست MHD ارائه داد. این سیستم‌ها براساس استفاده یا عدم استفاده از الکتروود در کانال شتاب‌دهنده، به دو دسته زیر تقسیم بندی می‌شوند:

۱. الکتروودار

۲. بدون الکتروود

این گونه سیستم‌های تولید تراست را بر اساس ساختار و جهت ایجاد شتاب در پلاسما نیز می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم بندی کرد:

۱. خطی

۲. دیسکی

همچنین این سیستم‌ها براساس نوع میدان مغناطیسی قابل تقسیم بندی هستند:

۱. میدان مغناطیسی خارجی

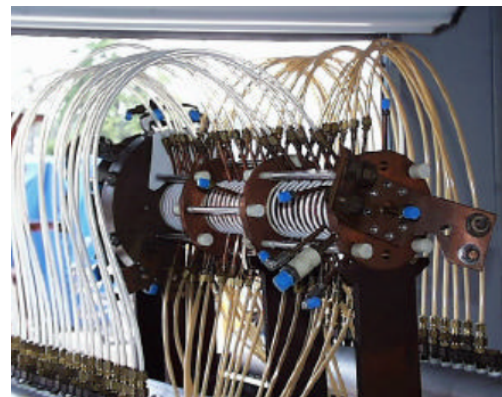
۲. میدان مغناطیسی خود القا

در این مقاله ابتدا سیستم‌های تولید تراست MHD براساس استفاده یا عدم استفاده از الکتروود دسته بندی و سپس با ذکر نمونه‌هایی از هر دسته سایر ویژگی‌های آن بیان شده است.

۱.۴ سیستم الکتروودار

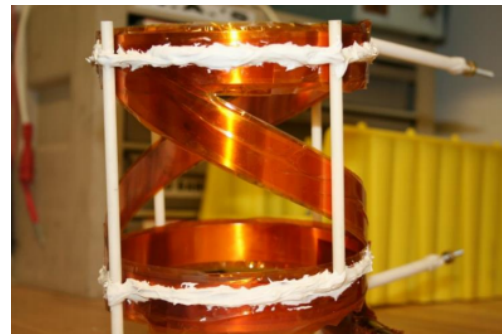
در این دسته از سیستم‌های تولید تراست MHD الکتروودها (کاتد و آند) به صورت موازی یا هم محور نسبت به هم در داخل کانال شتاب‌دهنده قرار می‌گیرند. با اعمال جریان الکتریکی ولتاژ بالا بین کاتد و آند، گاز خنثی ورودی تبدیل به پلاسما می‌شود [۱۱]. پیشران‌های الکتروودار از لحاظ میدان مغناطیسی می‌توانند هم دارای میدان خارجی و هم دارای میدان خود القا باشند. در ادامه ابتدا این سیستم‌های الکتروودار براساس میدان مغناطیسی و سپس

جمله تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا، رادیو فرکانسی (RF)^۱، لیزر و... نیز انجام می‌شود. شکل ۴ دستگاه ساخته شده توسط مرکز پروازهای فضایی مارشال ناسا برای تست یونیزاسیون در آزمایش سیستم‌های پیشران مجهز به روش MHD با نام MAPX^۱ را نشان می‌دهد. این دستگاه با توان MW - ۱/۵ به روش تخلیه الکتریکی، جریان گاز ورودی (سیال عامل سیستم پیشران) را تا ۴۰۰۰ - ۴۵۰۰ کلوین گرم کرده و سپس سیال عامل برای یونیزاسیون هرچه بیشتر توسط فلز قلیایی دانه دهی می‌شود. این دستگاه جهت تامین سیال عامل شتاب‌دهنده‌ای با میدان مغناطیسی ۲ تسلا و توان MW - ۲ طراحی و ساخته شده است.



شکل ۴: دستگاه یونیزاسیون درپیشران MHD برنامه MPAX [۷]

شکل ۵ یک آنتن ماریپچ را نشان می‌دهد که از فناوری رادیو فرکانسی RF جهت یونیزاسیون در پیشران‌هایی همچون HPT (یا HPH) بهره می‌برد.



شکل ۵: آنتن ماریپچ [۸]

۳ اصول عملکرد سیستم‌های تولید تراست

MHD

میدان الکترومغناطیسی، یک ویژگی فضا، ناشی از حرکت یک ذره باردار الکتریکی است. یک ذره باردار ساکن، تنها یک میدان الکتریکی در فضای اطراف تولید می‌کند. اگر ذره باردار در حال حرکت باشد، یک میدان مغناطیسی نیز تولید می‌شود. تعامل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی یک میدان الکترومغناطیسی ایجاد می‌کند. در شرایط خاص، این میدان الکترومغناطیسی را می‌توان به عنوان موج انتقال انرژی الکترومغناطیسی توصیف کرد [۹]. شکل ۶ میدان مغناطیسی ایجاد شده اطراف یک ذره باردار در حال حرکت

¹Magnetohydrodynamic Augmented Propulsion Experiment

براساس ساختار و جهت ایجاد شتاب تقسیم بندی شده اند.

۱.۱.۴ الکترودهدار با میدان مغناطیسی خارجی

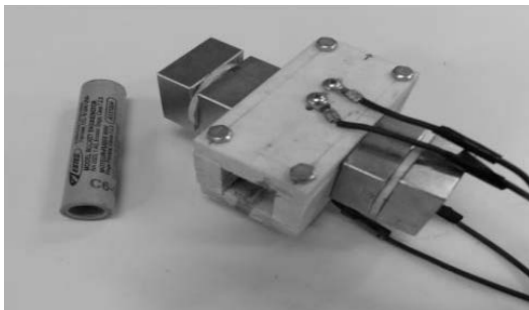
این سیستم‌ها به عنوان سیستمی الحاقی به پیشرانه‌های شیمیایی اضافه می‌شوند؛ لذا در اکثر مقالات با نام شتاب‌دهنده‌های MHD معرفی می‌شوند. این شتاب‌دهنده‌ها هم می‌توانند دارای ساختار خطی و هم دارای ساختار دیسکی باشند. شتاب‌دهنده‌های خطی براساس نوع به هم بسته شدن الکترودها و همچنین زاویه قرارگیری آنها نسبت به هم (θ در شکل ۷) به سه دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند [۱۲]:

۱. فارادی

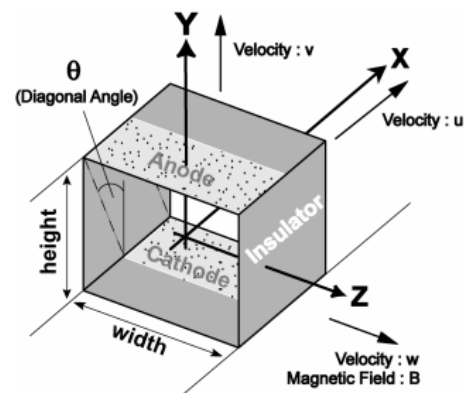
۲. هال

۳. قطری (مورب)

از موتور سوخت جامد مدل جهت تامین پلاسمای عامل، استفاده شده است. نتایج این آزمایش در شرایط خاص نشان داد که این شتاب‌دهنده می‌تواند سرعت گاز خروجی از موتور سوخت جامد مدل را از ۲۳۰ متر بر ثانیه در حالت اولیه، به طور میانگین تا ۵۸۰ متر بر ثانیه در طول یک دوره احتراق پایدار، افزایش دهد. همچنین نتایج حاکی از آن است که اعمال تخلیه الکتریکی به صورت پالسی نتیجه بهتری در افزایش سرعت پلازما دارد [۱۴]. این مطالعات با تحقیق بر روی نحوه تاثیر شکل و سطح مقطع الکترودها بر روی راندمان شتاب‌دهنده ادامه یافت. نتایج نشان داد که بیشترین سرعت گاز خروجی و تراست به ازای کمترین سطح مقطع الکترودها بدست می‌آید چرا که چگالی جریان به ازای سطح مقطع کوچکتر افزایش می‌یابد. همچنین نتایج تحقیقات نشان داد که الکترودها با سطح مقطع دایروی بهترین کارایی را برای شتاب‌دهنده به همراه دارد. [۱۵].



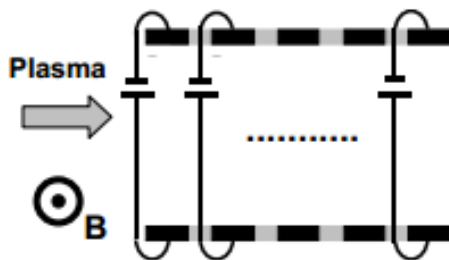
شکل ۹: نمونه آزمایشگاهی شتاب‌دهنده فارادی [۱۵]



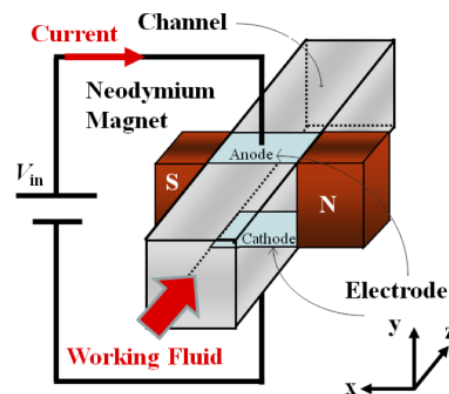
شکل ۷: تعریف شتاب‌دهنده MHD در دستگاه مختصات کارتزین [۱۲]

شکل ۱۰ طرح مفهومی یک شتاب‌دهنده فارادی با الکترودهای تقسیم شده را نشان می‌دهد. در این شتاب‌دهنده فارادی، الکترودها به صورت موازی به منبع تغذیه متصل می‌شوند. این امر بدان معناست که هر الکترودها به یک واحد تغذیه الکتریکی یا مبدل الکتریکی جداگانه احتیاج دارد. لذا این امر موجب پیچیدگی طراحی می‌شود، به طوری که منبع تامین توان این دسته از شتاب‌دهنده‌ها به طور خاص طراحی می‌شوند.

شکل ۸ یک نمونه ساده از یک کانال شتاب‌دهنده MHD را نشان می‌دهد. در این نمونه که به شتاب‌دهنده فارادی مشهور است، گاز ضمن ورود به کانال با تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا توسط الکترودهایی که به صورت موازی در طرفین قرار گرفته است تبدیل به پلازما شده و با اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی که عمود بر مسیر حرکت ذره و جریان الکتریکی است، نیرویی در جهت مسیر حرکت ذره به آن وارد می‌شود. بدین ترتیب سرعت آن افزایش یافته و به بیرون کانال پرتاب می‌شود.



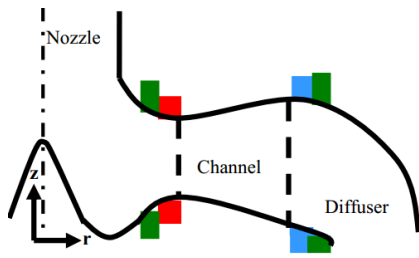
شکل ۱۰: طرح مفهومی شتاب‌دهنده فارادی با الکترودهای تقسیم شده [۱۲]



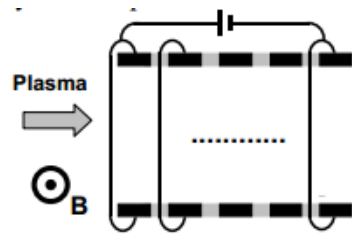
شکل ۸: شتاب‌دهنده فارادی [۱۳]

شکل ۱۱ طرح مفهومی یک شتاب‌دهنده هال را نشان می‌دهد. در این نوع از شتاب‌دهنده‌ها الکترودها به صورت سری به هم متصل می‌شوند. در این نوع اتصال اگرچه فقط به یک منبع تغذیه نیاز است و از پیچیدگی طراحی نیز کاسته می‌شود اما روی جریان گذرنده از هر الکترودها کنترل مطلوبی وجود ندارد. لذا این دسته از شتاب‌دهنده‌ها از لحاظ بازده و کارایی عملکرد، دچار ضعف هستند.

شکل ۹ یک آزمایش ساده از شتاب‌دهنده MHD که توسط محققین دانشگاه ناگاوای ژاپن طراحی شده است را نشان می‌دهد. در این آزمایش



شکل ۱۴: شتاب‌دهنده دیسکی مجهز به نازل و دیفیوزر [۱۷]

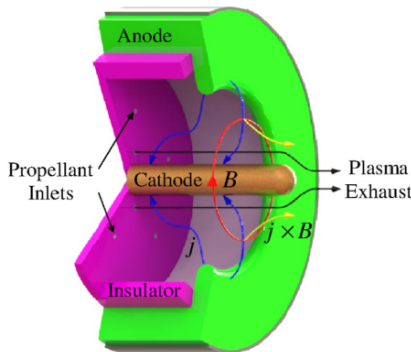


شکل ۱۱: طرح مفهومی شتاب‌دهنده هال

۲.۱.۴ الکتروودار با میدان مغناطیسی خود القایی

این دسته از سیستم‌های تولید تراست جزو پیشرانه‌های MHD با ساختاری خطی می‌باشند. این پیشرانه‌ها نیز از نیروی لورنتز برای سرعت بخشیدن به پلاسمای با چگالی انرژی بالا (پلازما حرارتی) بهره می‌برند. از جمله دستگاه‌هایی که متعلق به این کلاس می‌باشند می‌توان به پیشرانه‌های پلاسمایی پالسی PPT و پیشرانه‌های پلاسمادینامیکی مغناطیسی^۱ که در سیستم‌های پیشرانه فضایی استفاده می‌شوند و شتاب دهنده‌های DPS^۲ که به عنوان منبع نوترونی در همجوشی هسته‌ای استفاده می‌شوند، اشاره نمود [۱۸].

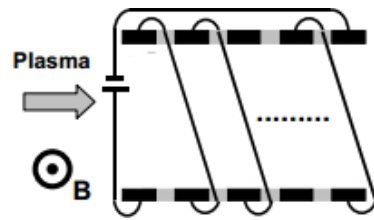
مکانیزم عملکرد پیشرانه MPD در شکل ۱۵ نشان داده شده است. ماده پیشران به داخل استوانه تزریق می‌شود. این ماده توسط ولتاژ بسیار بالای ایجاد شده بین کاتد و آند به پلازما تبدیل می‌شود. با تخلیه یک جریان چند هزار آمپری در پلازما، طبق قانون آمپر یک میدان مغناطیسی قدرتمند در جریان پلازما القا می‌شود. با تعامل میان جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی خود القا، پلازما طبق قانون لورنتز شتاب می‌گیرد [۱۹]. همان طور که از ماهیت اینگونه پیشرانه‌ها مشخص است برای مدل‌سازی آن‌ها نیاز به معادلاتی است که بتواند تعامل میدان الکترومغناطیسی و پلازما را نشان دهد. معادلات MHD می‌تواند به خوبی رفتار جمعی ذرات باردار در جریان پلازما در چنین شرایطی را نشان دهند [۲۰].



شکل ۱۵: اصول عملکرد پیشرانه MPD [۱۹]

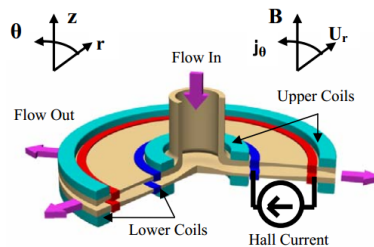
یکی از مهمترین مشکلات در پیشرانه‌های MPD خوردگی کاتد است. این مسئله باعث کاهش کارایی عملکرد پیشرانه و حتی از کار افتادن آن به مرور زمان می‌شود. دمای بسیار بالای کاری این موضوع را تشدید می‌کند. در مطالعاتی جداگانه که توسط اوشیو و همکاران [۲۱] انجام شده، دمای کاتد مورد بررسی قرار گرفت؛ و مشخص شد که به ازای جریان ۱۳ KA دمای

شکل ۱۲ یک شتاب‌دهنده قطری را نشان می‌دهد. این نوع از شتاب‌دهنده‌های MHD خصوصیات مشترکی از هر دو مدل فارادی و هال دارند. در شتاب‌دهنده قطری مانند شتاب‌دهنده هال، الکترودها به صورت سری به هم متصل می‌شوند و لذا تنها یک منبع تغذیه الکتریکی، بدون نیاز به مبدل‌های الکتریکی متعدد، می‌تواند الزامات سیستم را برآورده کند. از طرفی نیز در این نوع از شتاب‌دهنده‌ها جریان گذرنده از الکترودها توسط تغییر زاویه آنها نسبت به محور کانال کنترل می‌شود. لذا در مطالعات انجام شده، شتاب‌دهنده قطری به عنوان مدل مطلوب بین شتاب‌دهنده‌های محوری ارزیابی شده است [۱۲].



شکل ۱۲: طرح مفهومی شتاب‌دهنده قطری [۱۲]

نمای کلی از یک شتاب‌دهنده MHD دیسکی در مختصات استوانه ای در شکل ۱۳ نشان داده شده است. سیال عامل از طریق مجرای عمودی در جهت Z وارد شتاب‌دهنده می‌شود و در جهت شعاعی r از آن خارج می‌شوند. سیم‌پیچ‌های بالا و پایین عامل بوجود آورنده میدان مغناطیسی می‌باشند. اگر جریانی خارجی، قویتر از جریان القایی، بین الکترودها برقرار کنیم، نیرویی در جهت r به پلازما وارد شده که باعث شتاب دادن آن می‌شود. در اتصال الکترودها می‌توان از سه روش فارادی، هال و قطری استفاده کرد [۱۶].



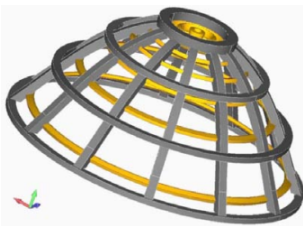
شکل ۱۳: شتاب‌دهنده MHD دیسکی با چینش الکترودها هال

یک ویژگی بسیار جالب شتاب‌دهنده دیسکی MHD این است که قادر است جریان پلازما را در جهت معکوس نیز به حرکت درآورد. به عبارت دیگر جریان در جهت منفی r وارد کانال شده، شتاب گرفته و در جهت z از آن خارج می‌شود. در این حالت به منظور افزایش کارایی از نازل مغناطیسی در خروجی استفاده می‌شود (شکل ۱۴).

¹Magneto-Plasmdynamic Thruster ²Dense Plasma Focus

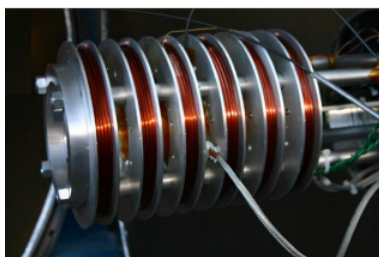
میدان مغناطیسی القا می‌شود که تعامل میان میدان مغناطیسی با پلاسما باعث می‌شود که پلاسما به بیرون محفظه پرتاب شود. نظریه MHD مناسب‌ترین گزینه در دسترس برای مطالعه عملکرد این سیستم می‌باشد [۲۲].

یکی دیگر از انواع نازل‌های مغناطیسی، نازل همگرا-واگرا است. در این سیستم سیم‌لوله‌ای حاوی جریان الکتریکی قوی به دور کانالی با سطح مقطع دایروی قرار می‌گیرد. در این کانال در مقطعی که سیم‌لوله قرار دارد، وقتی از سمت مرکز سیم‌لوله به سمت دیواره حرکت می‌کنیم فشار مغناطیسی افزایش یافته و فشار پلاسما کاهش می‌یابد [۲۳]. این امر باعث می‌شود که پلاسما از سمت دیواره به سمت مرکز کانال رانده شود. بدین ترتیب یک گلوگاه در قسمت میانی تشکیل می‌شود. با تنظیم جریان عبوری از سیم‌لوله ماخ جریان پلاسما در گلوگاه به یک می‌رسد و نازل همگرا-واگرای ایده‌آل تشکیل می‌شود.

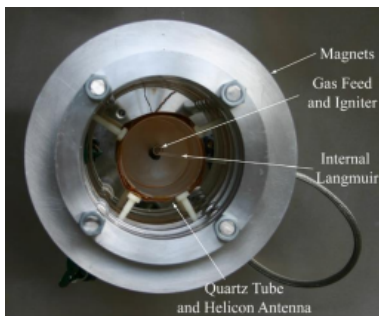


شکل ۱۷: نازل مغناطیسی پیشرانه هسته‌ای [۲۲]

شکل ۱۸ یک پیشرانه HPH (یا HPT) را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً نیز گفته شد این پیشرانه‌ها از آنتن مارپیچی برای یونیزاسیون استفاده می‌کنند. در این پیشرانه سیم‌پیچ‌های مغناطیسی با مکانیزمی مشابه آنچه در قسمت قبل گفته شد، پلاسمای تولیدی را شتاب می‌دهند. در این پیشرانه‌ها از آنتن مارپیچ دومی برای ایجاد شار مغناطیسی چرخشی و تولید تراسست بیشتر استفاده می‌شود [۲۴]. شکل ۱۹ طرحی مفهومی از نحوه عملکرد یک پیشرانه HPT را نشان می‌دهد.



(الف)



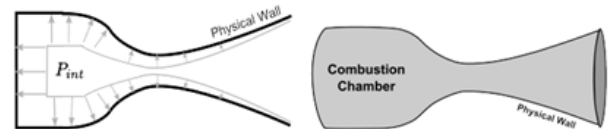
(ب)

شکل ۱۸: پیشرانه HPT [۲۴]

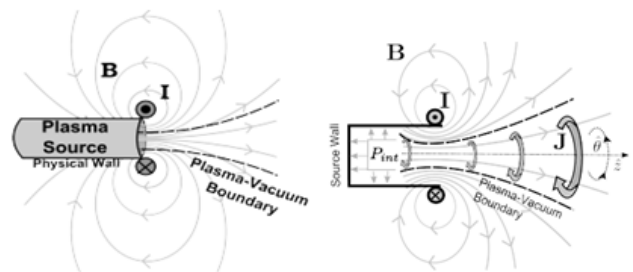
نوک کاتد به $K = 2500$ می‌رسد. در بخش‌هایی از آن دما تا $K = 3000$ افزایش می‌یابد.

۲.۴ سیستم بدون الکتروود

در این گونه سیستم‌های تولید تراسست، سیال عامل قبل از ورود به کانال پیشرانه MHD، یونیزه می‌شود. ساختار سیستم‌های تولید تراسست MHD بدون الکتروود، خطی و میدان مغناطیسی آنها عمدتاً خارجی است. از جمله سیستم‌های تولید تراسستی که از این مدل پیروی می‌کنند، نازل‌های مغناطیسی می‌باشند. توزیع فشار در نازل‌های مغناطیسی اساساً مشابه نازل‌های لاوال است. این نازل‌ها انرژی درونی سیال را تبدیل به انرژی جنبشی می‌کنند. مزیت نازل‌های مغناطیسی این است که تماس پلاسمای داغ با سطح را به حداقل می‌رسانند؛ ضمن آن که مکانیزمی را فراهم می‌آورند تا در تعامل با پلاسما، آن را شتاب داده و تراسست مضاعف تولید کنند. در واقع این‌گونه نازل‌ها علاوه بر اینکه با استفاده از مسائل دینامیک گازی راندمان پیشرانه را افزایش می‌دهند، با اعمال نیروی محرک، باعث افزایش سطح تراسست می‌شوند. تفاوت بین نازل مغناطیسی و نازل لاوال در یک مقایسه در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

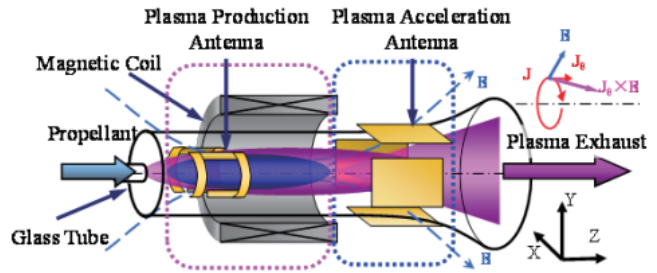
شکل ۱۶: مقایسه ساختار و توزیع فشار در نازل مغناطیسی و لاوال [۶] (الف) نازل لاوال (ب) نازل مغناطیسی

یکی از سیستم‌های پیشرانه‌ای که از نازل مغناطیسی استفاده می‌کنند، پیشرانه‌های هسته‌ای هستند. پیشرانه‌های هسته‌ای به دلیل قابلیت‌های بالقوه‌ای که دارند، با فراهم کردن دسترسی سریع به مقصدهای بین سیاره‌ای، می‌توانند انقلابی در اکتشافات فضایی ایجاد کنند. یکی از آخرین نازل‌های مغناطیسی که متناسب با پیشرانه‌های هسته‌ای طراحی شده است با نام (محفظه واکنشی سهمی وار چند سیم‌پیچ^۱) شناخته می‌شود. ساختار این نازل و نحوه عملکرد آنها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. محفظه این نازل به شکل سهمی بوده و توسط سیم‌پیچ‌های حلقوی ابررسانا که به صورت هم محور نسبت به هم قرار گرفته‌اند، احاطه شده است. این سیم‌پیچ‌ها وظیفه تامین میدان مغناطیسی را بر عهده دارند. این میدان مانع از تماس پلاسمای بسیار داغ با بدنه محفظه می‌شود. با عبور پلاسما از محفظه جریان الکتریکی در پوسته رسانایی که سطح سیم‌پیچ‌ها (حلقه‌های زرد) را پوشانده،

¹Multi-Coil Parabolic Reaction Chamber ²Helicon Plasma Thruster

مختلفی از جمله افزایش دمای گاز، دانه دهی با فلزات قلبایی، RF، تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا و... صورت می‌گیرد. اگرچه سیستم‌های تولید تراست MHD می‌توانند به عنوان پیشراندهای مستقل عمل کنند، اما در بعضی موارد نیز به عنوان راه حلی برای افزایش کارایی پیشراندهای شیمیایی پیشنهاد می‌شوند. معمولاً در این موارد به عنوان شتاب‌دهنده MHD شناخته می‌شوند. معیارهای مختلفی می‌توان برای دسته‌بندی سیستم‌های تولید تراست MHD در نظر گرفت. دسته‌بندی این سیستم‌ها می‌تواند بر اساس استفاده یا عدم استفاده از الکتروود، شکل ساختاری و نوع میدان مغناطیسی صورت پذیرد.

در این مطالعه ابتدا این سیستم‌ها بر اساس استفاده یا عدم استفاده از الکتروود به دو دسته کلی تقسیم بندی شده‌اند و سپس با ذکر نمونه‌هایی از هر دسته سایر ویژگی‌های آنها بیان شده است. جدول ۱ خلاصه‌ای از نمونه‌های بررسی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: طرح مفهومی نحوه عملکرد پیشرانه [۱۵]

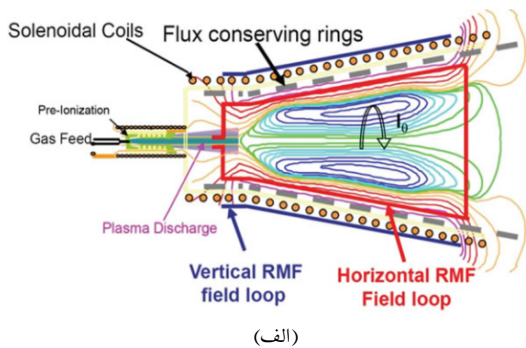
در دسته‌های دیگر از پیشراندهای بدون الکتروود، از میدان مغناطیسی چرخشی (RMF^۱) برای شتاب دادن به ذرات پلاسما استفاده می‌شود. ضمن آنکه سیال عامل قبل از ورود به کانال شتاب‌دهنده یونیزه می‌شود، با ورود سیال به کانال این میدان‌های چرخشی نیز باعث یونیزاسیون هرچه بیشتر ذرات می‌شوند.

در کانال یک سری ساختارهای پلاسمایی مغناطیسی شده، با حرکت چرخشی معکوس نسبت به هم، با نام FRC^۲ تشکیل می‌شوند که در تعامل با میدان الکتریکی حلقه‌های رسانای اطراف کانال در یک حرکت محوری در طول کانالی با هندسه مخروطی به بیرون پرتاب می‌شوند و تراست تولید می‌کنند [۲۶]. شکل ۲۰ طرح مفهومی یک پیشرانه بدون الکتروود و همچنین مدل ساخته شده توسط محققان دانشگاه واشنگتون بر مبنای این طرح را نشان می‌دهد. در این شکل ساختارهای FRC به خوبی دیده می‌شوند.

در نمونه‌های دیگر از پیشراندهای MHD بدون الکتروود با نام PIT^۳ از جریان الکتریکی پالسی برای القای شار الکتریکی در پلاسما استفاده می‌شود. این پیشرانه از یک سیم پیچ تخت بهره می‌برد. جریانی از سیال عامل (پلاسما) به سطح سیم پیچ تزریق می‌شود. با عبور جریان الکتریکی به صورت پالسی از این سیم پیچ، شار الکتریکی در لایه نازکی از سیال عامل القا می‌شود. علاوه بر این عبور جریان الکتریکی از سیم پیچ یک میدان مغناطیسی در جهت شعاعی ایجاد می‌کند. تعامل میان میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی القایی در پلاسما، باعث شتاب دادن آن و تولید تراست در جهت محور پیشرانه می‌شود [۲۷]. شکل ۲۱ یک پیشرانه PIT را نشان می‌دهد. در این مدل، پلاسما از قسمت جلویی (دماغه مخروطی شکل) به سمت سیم پیچ مسطح تزریق می‌شود [۲۸].

۵ نتیجه گیری

هدف از انجام این مطالعه، دسته‌بندی سیستم‌های تولید تراست MHD و ارائه اصول عملکرد آنها می‌باشد. این سیستم‌ها دارای سطح مطلوبی از تراست و همچنین ضربه ویژه هستند. این ویژگی‌ها، امکان استفاده از این نوع پیشراندها را در انواع ماموریت‌ها فراهم می‌آورد. لذا در طی سال‌های اخیر این سیستم‌ها بسیار مورد توجه مهندسين و پژوهشگران صنعت هوافضا قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها با تکیه بر نیروی الکترومغناطیسی و بر پایه قانون لورنتز طراحی و ساخته می‌شوند؛ لذا سیستم‌های تولید تراست MHD جزو سیستم‌های الکترومغناطیسی محسوب می‌شود و از لحاظ سیال عامل نیز در دسته سیستم‌های پلاسمایی قرار می‌گیرند. تولید پلاسما به روش‌های

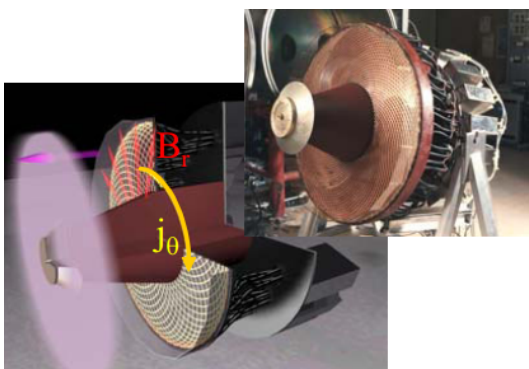


(الف)



(ب)

شکل ۲۰: پیشرانه بدون الکتروود با ساختارهای FRC (الف) طرح مفهومی (ب) مدل تجربی



شکل ۲۱: پیشرانه PIT و نحوه عملکرد آن [۲۸]

¹Rotating Magnetic Field

²Field Reversed Configuration

³Pulsed Inductive Thruster

[11] K. V. Brushlinskii, A. N. Kozlov, and V. S. Konovalov, Numerical Models of Steady State and Pulsating Flows of Self Ionizing Gas in Plasma Accelerator Channels, Springer, Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vol. 55, No. 8, pp. 1370-1380, 2015

[12] Nobuomi Sakamoto, Junichi Kondo, Nobuhiro Harada, Computational Study of MHD Accelerator, 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, San Francisco, California, 5 - 8 June 2006

[13] Yusuke SASAKI, Shinji TAKESHITA, Toru SASAKI, Takashi KIKUCHI, Tsukasa ASO, Makoto HARADA, Nob. HARADA, Numerical Analysis of Acceleration Obtained from Pulsed-Linear-MHD Accelerator Using Model Rocket Engine, The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, Volume 9, 2014

[14] Nob. Harada, A. Kubo, H. Ishizuka, T. Kikuchi, T. Sasaki, Experiments for Pulsed MHD Accelerator driven by Model Rocket Engine, 41st Plasmadynamics and Lasers Conference, Chicago, Illinois, 28 June - 1 July, 2010

[15] Yuichi Takai, Sho Takayanagi, Tomohiro Tanaka, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Tsukasa Aso and Nob. Harada, Experiments on Pulsed Linear MHD Accelerator, 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Grapevine (Dallas/Ft. Worth Region), Texas, 07 - 10 January, 2013

[16] Shinji Takeshita, Nobuhiro Harada, The Effect of Magnetic Nozzle for Disk Magnetohydrodynamic Accelerator, IEEE, Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 3, No. 1, pp. 32-37, 2013

[17] Shinji Takeshita, Chainarong Buttapeng, Nobuhiro Harada, Improvement of Disk MHD Accelerator with Nozzle and Diffuser, 39th Plasmadynamics and Lasers Conference, Seattle, Washington, 23 - 26 June 2008

[18] Vivek Subramaniam and Laxminarayan Raja, Fully Implicit Resistive Magnetohydrodynamic simulations of Coaxial Plasma, Accelerators 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Grapevine, Texas, 9 - 13 January, 2017

[19] Kenji Miyazaki, Syun Takenaka, Kkoh Funaki, Hideyuki Horisawa, Experimental Study of a 1-MW-Class Quasi-Steady-State Self-Field Magnetoplasma Thruster, The 33rd International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, USA October 6 - 10, 2013

[20] M. Ahangar, R. Ebrahimi, and M. Shams, Numerical Investigation of Plasma Behavior and Anode Sheath in a Magnetoplasma Thruster, JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, March, Vol. 32, No. 2 : pp. 420-430, 2016

[21] Yuya Oshio, Satoshi Tonooka, Kkoh Funaki, Thrust Performance and Cathode Temperature Evaluation of MW Class Quasi-Steady MPD Thruster, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, UT, July 25-27, 2016

[22] Gherardo Romanelli, Andrea Mignone, Angelo Cervone, Pulsed fusion space propulsion: Computational Magneto-Hydro Dynamics of a multicoil parabolic reaction chamber, Acta Astronautica, 29 July 2017, online published, DOI:10.1016/j.actaastro.2017.07.045

[23] Heath Lorzel, Pavlos G. Mikellides, Three-Dimensional Modeling of Magnetic Nozzle Processes, AIAA JOURNAL, Vol. 48, No. 7, July 2010

جدول ۱: نمونه‌های سیستم تولید تراست در این تحقیق

ساختار			
دیسکی	خطی		
مثال	خارجی	میدان مغناطیسی	الکتروودار
۱- فارادی ۲- هال ۳- قطری			
—	خودالقا	میدان مغناطیسی	بدون الکتروودار
—	نازل مغناطیسی HPT PIT		
—	خودالقا		

مراجع

[1] Hannes Alfvén, February 01, 2017, www.britannica.com/biography/Hannes-Alfvén

[2] Frans H. Ebersohn, Sharath S. Girimaji, and David Staack, Magnetic Nozzle Plasma Plume: Review of Crucial Physical Phenomena, 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, USA, Atlanta, Georgia 30 July - 01 August 2012

[3] Dhanireddy R. Reddy and Isaiah Blankson, Emerging Air-Breathing Propulsion Technologies, Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley & Sons, Ltd, Online © 2010, DOI: 10.1002/9780470686652.eae099

[4] R. Balasubramanian, K. Anandhanarayanan, R. Krishnamurthy, Debasis Chakraborty, Magnetohydrodynamic Flow Control of a Hypersonic Cruise Vehicle Based on AJAX Concept, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, Vol. 53, No. 4, July-August 2016

[5] Eric Berger, NASA's longshot bet on a revolutionary rocket may be about to pay off, 2/22/2017, <https://arstechnica.com/science/2017/02/nasas-longshot-bet-on-a-revolutionary-rocket-may-be-about-to-pay-off>

[6] Frans H. Ebersohn, Benjamin W. Longmiery, and J.P. Sheehan, Preliminary Magnetohydrodynamic Simulations of Magnetic Nozzles, 33rd International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, Washington, D.C., USA, October 6/10, 2013

[7] J. T. Lineberry, J. N. Chapman, H. J. Schmidt, and C. W. Lineberry, Magnetohydrodynamic Augmented Propulsion Experiment: I. Performance Analysis and Design, 33rd AIAA Plasmadynamics & Lasers Conference, 14th International Conference on MHD Power Generation and High Temperature Technologies, Maui, Hawaii, 20-23 May 2002

[8] B. Race Roberson, Ian Johnson, Effects of Magnetic Nozzles and a Downstream Antenna to the High Power Helicon Thruster, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, UT, July 25-27, 2016

[9] magnetic force, Encyclopædia Britannica, inc., June 08, 2017, <https://www.britannica.com/science/magnetic-force>

[10] D. Marett, Explaining the Lorentz Force Using Magnetic Lines of Force-Maxwell's Fluid-Mechanical Approach, 2013, <http://www.conspiracyoflight.com/Lorentz/Lorentzforce.html>

- [24] B. Race Roberson, Ian Johnson, Effects of Magnetic Nozzles and a Downstream Antenna to the High Power Helicon Thruster, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, UT, July 25-27, 2016
- [25] By Takahiro NAKAMURA, Hiroyuki NISHIDA, Shunjiro SHINOHARA, Ikkoh FUNAKI, Takao TANIKAWA Tohru HADA, Preliminary Investigation of Electromagnetic Thrust Characteristics in Electrodeless Compact Helicon Plasma Thruster, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 12, No. ists29, pp. Po_1_1-Po_1_6, 2014
- [26] T. E. Weber, J. T. Slough, and D. Kirtley, The electrodeless Lorentz force (ELF) thruster experimental facility, AIP Publishing, Volume 83, Issue 11, 2012
- [27] F. J. Wessel, N. Bolte, V. Kiyashko, M. Morehouse, T. Roche, and M. Slepchenkov, Pulsed-Inductive Thruster, Fusion Engineering (SOFE), 2013 IEEE 25th Symposium on, San Francisco, CA, USA, 10-14 June 2013
- [28] Pavlos G. Mikellides, Darcy L. Allison, Modeling of the Pulsed Inductive Thruster, (PIT) operating with Ammonia Propellant, Presented at the 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, October 31 – November 4, 2005