

نقش روش‌های الکترو هیدرودینامیک و مگنتو هیدرودینامیک در صنایع هوافضا

محمد پورجعفرقلی

دکتری تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران

*مستول مکاتبات: mpourjafargholi@gmail.com

◀ واژگان کلیدی

ای.اچ.دی
ام.اچ.دی
پلازما
ژنراتور
پیشرانه یونی

◀ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۶/۳۱

◀ چکیده

الکترو هیدرودینامیک (ای.اچ.دی) مطالعه میدان جریان ناشی از میدان الکتریکی و تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی جنبشی است. این انرژی جنبشی برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی مانند خنک‌کاری تراشه یکپارچه، کاهش پسا در هواپیما، اسپری کردن مواد دی‌الکتریک برای چاپ و همچنین موتورهای ای.اچ.دی و پمپاژ استفاده می‌شود. مگنتو هیدرودینامیک (ام.اچ.دی) نیز مطالعه دینامیک سیالات رسانای الکتریکی مانند پلازما، فلزات مذاب و آب نمک می‌باشد. طبق اثر فارادی اگر یک سیال رسانای الکتریسته درون یک میدان مغناطیسی حرکت کند در اثر اندرکنش سیال متحرک و میدان مغناطیسی، انرژی جنبشی سیال به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. محرک‌های پلازما بر اساس اثرات متقابل ام.اچ.دی و ای.اچ.دی به طور بالقوه می‌توانند ویژگی‌های دینامیکی سیالات را در اطراف یک جسم پرنده بدون قطعات متحرک تغییر دهند. این امر می‌تواند به کنترل یک هواپیما با زمان پاسخ ناچیز، قابلیت اطمینان بیشتر و پیشرفت‌های بزرگی در عملکرد پرنده منجر شود. در این مقاله ضمن معرفی روش‌های ای.اچ.دی و ام.اچ.دی، به نحوه استفاده از آنها در تولید برق برای صنایع بویژه هوافضا پرداخته می‌شود.

۱ مقدمه

هیدرودینامیک، مطالعه عملکرد و حرکت مکانیکی سیالات در حال حرکت می‌باشد. مگنتو هیدرودینامیک^۱ نیز علم مطالعه خواص مغناطیسی سیالات رسانای الکتریکی می‌باشد. ام.اچ.دی اندرکنش بین فلزات مایع یا ذرات فرومغناطیس داخل جریان و میدان الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیرد. در مدل ام.اچ.دی معادلات ماکسول الکترو دینامیکی با معادلات سیال ترکیب می‌شوند که شامل نیروهای لورنتز ناشی از میدان مغناطیسی نیز می‌شود. ترکیب بین میدان جریان سیال و میدان مغناطیسی بر اساس دو تاثیر اساسی قابل درک می‌باشد:

- الفای جریان الکتریکی به خاطر حرکت ماده رسانا در یک میدان مغناطیسی
- تاثیر نیروی لورنتز که نتیجه اندرکنش میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی می‌باشد.

الکترو هیدرودینامیک^۲ نیز که بنام دینامیک سیالات رسانای الکتریکی یا الکتروکینتیک (الکترو دینامیک مدارهای الکتریکی) نیز شناخته شده است، مطالعه پویایی سیالات باردار و رسانای الکتریکی می‌باشد. ای.اچ.دی انواع مکانیزمهای انتقال ذره و سیال زیر را پوشش می‌دهد: الکتروفورز^۳، الکتروکینزی^۴، دی الکتروفورز^۵، الکترواسموس^۶ و الکتروروتیشن^۷.

ای.اچ.دی یک حوزه تحقیقاتی بین رشته‌ای شامل الکترواستاتیک (مطالعه بارهای الکتریکی و نیروهای بین آنها در حالتی که بار چشمه بدون حرکت است یعنی باری که بر آن نیرو وارد می‌شود می‌تواند حرکت کند)، پلاسمای غیر حرارتی (پلاسمایی که در تعادل ترمودینامیکی نیست، یا به

دلیل اینکه دمای یون از دمای الکترون متفاوت است یا توزیع سرعت گونه‌ها از توزیع ماکسول- بولتزمن پیروی نمی‌کند، بخشی از گاز یونیزه شده است که انرژی آن بیشتر در الکترونهای آزاد ذخیره می‌شود و دمای کلی کم است.)، الکتروشیمی (شاخه‌ای از شیمی فیزیک و شیمی تجزیه است که به بررسی واکنش‌های شیمیایی می‌پردازد که در اثر عبور جریان الکتریکی انجام می‌شوند یا انجام یافتن آنها سبب ایجاد جریان الکتریکی می‌شود.)، الکترومکانیک (رشته‌ای میان رشته‌ای و تلفیقی از مهندسی مکانیک و مهندسی الکترونیک) ذرات، انتقال حرارت و مکانیک سیالات می‌باشد. از موارد استفاده تکنیک ای.اچ.دی می‌توان به پیشرانس و پمپاژ در صنایع مختلف اشاره کرد. به عنوان مثال ناسا [۱] امکان استفاده از ای.اچ.دی را در سیستم‌های پیشرانه الکتریکی مانند پیشرانه‌های^۸ ای.اچ.دی یا یونی مورد بررسی قرار داده اند. ناسا برای این منظور پروژه‌ای را تحت عنوان پیشرانه تکاملی زنون ناسا^۹ (NEXT) راه اندازی کرده است. اخیرا محققان ام.آی.تی (MIT) [۲] دریافتند که باد یونی (با پیشرانه ۱۱۰ نیوتن بر کیلووات) در هر کیلووات ۵۵ برابر یک موتور جت (با پیشرانه ۲ نیوتن بر کیلووات) پیشرانه تولید می‌کند.

از مزایای استفاده از سیستم پیشرانه باد یونی می‌توان راندمان بالا، عملیات بی صدا و نامرئی در مادون قرمز را نام برد. همچنین در سال‌های اخیر علاقه رو به رشدی در استفاده از تکنیک ای.اچ.دی برای کنترل جریان با استفاده از فعال کننده‌های پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک وجود دارد [۳، ۴]. تخلیه سد دی‌الکتریک^{۱۰} روشی نوین برای تولید پلازما محسوب می‌شود که توجه صنعتگران را در زمینه‌های گوناگون به خود معطوف کرده است. در این روش، یک یا هر دو الکتروود با یک ماده دی‌الکتریک پوشانده می‌شود. حضور دی‌الکتریک در بین الکتروودها از ایجاد تخلیه قوسی جلوگیری می‌کند.

¹Magneto Hydro Dynamic (MHD)²Electro Hydro Dynamic (EHD)³Electrophoresis⁴Electro-kinesis⁵Di-electrophoresis⁶Electro-osmosis⁷Electro-rotation⁸Thrusters⁹NASA Evolutionary Xenon Thruster (NEXT)¹⁰Dielectric Barrier Discharge (DBD)

۲ الکتروفورز

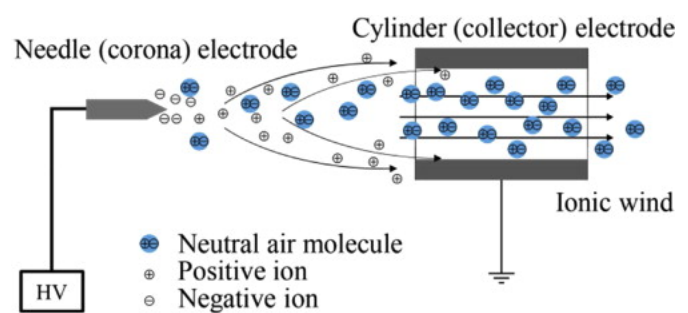
الکتروفورز به معنی حمل الکترون از دو کلمه Electro (الکتریکی) و phoresis به معنی حرکت و انتقال ذره تشکیل شده است و در کل به معنی حرکت ذرات در یک سیال تحت یک میدان الکتریکی یکنواخت فضایی است [۷-۱۲]. به سبب اینکه ماکرومولکولهای زیستی مانند دی‌ان‌ای و پروتئینها باردار هستند می‌توان با قرار دادن آنها در یک میدان الکتریکی، آنها را بر اساس خواص فیزیکی مانند شکل فضایی، وزن مولکولی و بار الکتریکی، تفکیک کرد. الکتروفورز ذرات با بار مثبت (کاتیون‌ها) کاتافورز و الکتروفورز ذرات با بار منفی (آنیون‌ها) آنافورز نامیده می‌شود.

۳ الکتروکینزی

الکتروکینزی (الکترودینامیک مدارهای الکتریکی یا کنترل الکتریسته) عبارت است از انتقال ذره یا سیال تولید شده توسط یک میدان الکتریکی فعال بر روی سیالی که یک بار الکتریکی خالص دارد. این پدیده اولین بار در طی سال ۱۸۰۸ توسط رتس^۴ در الکتروفورز ذرات رس مشاهده شد [۱۳]. این اثر همچنین در سال ۱۹۲۰ توسط توماس تانسنند براون^۵ با نام اثر بیوفلد براون^۶ منتشر شد، هرچند به نظر می‌رسد که این اثر به عنوان میدان الکتریکی فعال بر روی گرانش شناخته می‌شود [۱۴]. سرعت جریان در چنین مکانیسمی در میدان الکتریکی خطی است. الکتروکینزی اهمیت قابل توجه عملی در میکروفلوئیدیکها^۷ دارد [۱۵-۱۷]. زیرا این روش راهی برای دستکاری^۸ و انتقال سیالات در میکروسیستم‌ها دارد که تنها با استفاده از میدان‌های الکتریکی و بدون قطعات متحرک صورت می‌پذیرد. میکروفلوئیدیک‌ها به رفتار، کنترل دقیق و دستکاری سیالاتی اشاره می‌کند که از لحاظ هندسی به یک مقیاس کوچکتر از میلی‌متر محدود می‌شوند. این یک میدان چند رشته‌ای در تقاطع مهندسی، فیزیک، شیمی، بیوشیمی، فناوری نانو و بیوتکنولوژی است و کاربرد عملی در طراحی سیستم‌هایی دارد که در آن حجم کم سیالات برای رسیدن به توزیع خودکار^۹، مکانیزه کردن^{۱۰} و غربالگری عملکرد بالا^{۱۱} آماده می‌شود. میکروفلوئیدیک‌ها در اوایل دهه ۱۹۸۰ ظهور کرده و در توسعه چاپگرهای جوهر افشان، تراشه‌های دیجیتال، تکنولوژی آزمایشگاه بر روی تراشه و تکنولوژی‌های میکروموتور و میکروحرارتی استفاده می‌شود. به طور معمول، سیالات انتقال داده می‌شوند، مخلوط یا جدا شده و یا به طور دیگر پردازش و آماده‌سازی می‌شوند. برنامه‌های کاربردی متعددی از روش‌های کنترل غیر فعال سیال مانند نیروهای موئینگی استفاده می‌کنند. در بعضی از برنامه‌های کاربردی، وسایل راه‌اندازی خارجی نیز برای انتقال مستقیم از محیط استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان محرک‌های چرخشی با استفاده از نیروهای گریز از مرکز برای انتقال سیال در تراشه‌های غیر فعال را نام برد. میکروفلوئیدیک‌ها به دستکاری تعریف شده سیال عامل بوسیله اجزای فعال (میکرو) مانند میکرو پمپ‌ها یا میکروولوها اشاره دارد. میکروپمپ‌ها مایعات را به طور مداوم یا به صورت پیمانه‌ای تحویل می‌دهند. میکروولوها جهت جریان یا حالت حرکت مایعات پمپ شده را تعیین می‌کنند. اغلب فرایندهایی

در میان سیستم‌های مختلف، استفاده از سد تخلیه الکتریکی صفحه به صفحه به دلیل ویژگیهایی که دارد، مرسوم‌تر شده است. بازدهی این سیستم بیش از ۹۰٪ بوده و توانایی تولید پلاسماهای حجیم را دارد. همراه این دستگاه ۵ جفت الکتروود در ابعاد مختلف ارائه می‌شود تا بستری مناسب برای کاربردهای متنوع ایجاد شود. از طرفی امکان تنظیم مدت زمان پردازش باعث تسهیل کار و افزایش دقت می‌شود. با توجه به طراحی ساده و مناسب دستگاه، کاربر به راحتی می‌تواند از آن استفاده کرده و به مقصود خویش نائل آید.

باد یونی شکل ۱ (باد کرونال یا باد الکتریکی) نیز جریان هوای القا شده بوسیله نیروهای الکترواستاتیکی مرتبط با تخلیه کرونا را توصیف می‌کند که در انتهای بعضی رساناهای الکتریکی تیز (مانند نقاط یا تیغه‌ها) بوقوع پیوسته و نسبت به زمین در معرض ولتاژ بالا قرار دارد. باد یونی یک پدیده الکترو هیدرودینامیک است.



شکل ۱: باد یونی

از موارد استفاده باد یونی می‌توان تیغه‌های توربین بادی هوشمند^۱ با ماژول‌های حسگر-محرک-کنترل کننده یکپارچه^۲ را نام برد که برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی طراحی شده اند [۵]. علاوه بر این، تکنیک ای.اچ.دی آینده امید بخشی را برای یک ژنراتور بادی با توربین کوچک^۳ ابتکاری نشان می‌دهد [۶]. این توربین‌ها با هزینه تولید پایین‌تر و ظرفیت تولید بالاتر، پتانسیل تجاری شدن در مزارع بادی دور از ساحل را دارند. متخصصان آمریکایی روش تازه‌ای برای خنک کردن رایانه‌ها ابداع کرده‌اند که در این روش، به جای آنکه قطعات رایانه با جریان هوای حاصل از پنکه خنک شود، جریان هوای حاوی ذرات باردار (باد یونی) باعث خنک شدن قطعات رایانه می‌شود. مشکلی که روش کنونی به وجود می‌آورد این است که جریان هوای حاصل از حرکت دورانی پنکه، مولکول‌هایی را که نزدیک به تراشه‌های رایانه‌اند به آنها می‌چسباند و این مولکول‌ها مانع از خنک شدن تراشه می‌شوند. در روش جدید، قطعه‌ای روی یک تراشه نصب می‌شود که با وصل کردن جریان برق به آن و ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی، ذرات باردار در آن ایجاد می‌گردد و این ذرات از یک سو به سوی دیگر قطعه به صورت مرتب حرکت می‌کنند. این ذرات باردار مانع از آن می‌شوند که مولکولهای نزدیک به تراشه‌ها که بر اثر جریان هوای پنکه به حرکت در آمده‌اند به تراشه‌ها بچسبند و بجای آن، جذب دو قطب قطعه‌ای می‌شوند که روی تنها یک تراشه نصب شده است، تراشه‌ای که کاربردی در رایانه ندارد و اصطلاحاً تراشه ایزدانی خوانده می‌شود.

¹Smart wind turbine blades ²Integrated sensor-actuator-controller modules ³Turbine-less wind generator ⁴Reuss ⁵Thomas Townsend ⁶Biefeld-Brown ⁷Microfluidics ⁸Manipulate ⁹Multiplexing ¹⁰Automation ¹¹High-throughput screening

می‌رود [۱۶، ۱۷]. پمپ‌های الکترواسموتیک هنگامی که مایع الکتروولت با یک سطح جامد در تماس قرار می‌گیرد باعث تولید بارهای سطحی می‌شود. به علت وجود بارهای الکتریکی روی سطح (مثبت یا منفی)، یونهای موجود در سیال در نزدیکی سطح تغییر آرایش داده و یونهای مخالف در جریان توده سیال در کنار این صفحه قرار می‌گیرند و لایه دوگانه الکتریکی را تشکیل می‌دهد. قسمتی از یونهای متضاد وقتی تحت تأثیر میدان الکتریکی موازی با دیوارها قرار می‌گیرند باعث حرکت یونهای سیال می‌شود. این یونهای متحرک توده سیال را به حرکت درمی‌آورند. در حالتی که دیوارها از جنس سرامیک سیلیکون باشند در pH بیشتر از ۴، از گروه‌های قطبی جدا شده و بار منفی روی سطح جمع می‌شود.

۶ دو لایه الکتریکی

یک دو لایه (DL)، یا دو لایه الکتریکی (EDL) ساختاری است که در سطح یک جسم هنگام برخورد با یک سیال ظاهر می‌شود. جسم ممکن است یک ذره جامد، یک حباب گاز، یک قطره مایع یا یک حجم متخلخل باشد. DL به دو لایه موازی جسمی با محیط باردار الکتریکی اشاره دارد. لایه اول، سطح باردار (با بار مثبت یا منفی)، شامل یونهای جذب شده در جسم به دلیل تعاملات شیمیایی و لایه دوم از یونهای جذب شده به سطح باردار بواسطه نیروی کولن تشکیل شده است که بصورت الکتریکی لایه اول را غربال می‌کند. لایه دوم به راحتی با جسم مرتبط است و از یونهای آزاد ساخته شده است که در اثر جاذبه الکتریکی و حرکت حرارتی در سیال حرکت می‌کند. بنابراین لایه دوم لایه نفوذ^۴ نیز نامیده می‌شود.

۷ الکتروفورز مویین

الکتروفورز مویین یک روش جداسازی الکتروسینتیک است که در لوله‌های مویین با قطر زیر یک میلی‌متر و در کانال‌های میکرو و نانو فلوئیدیک انجام می‌شود. اغلب، الکتروفورز به الکتروفورز ناحیه مویین^۵ اشاره دارد، اما سایر روش‌های الکتروفورز شامل الکتروفورز مویین ژلی، تمرکز ایزوالکتریک مویین، ایزوتاکوفورز^۶ مویین و کروماتوگرافی الکتروسینتیک میسلی^۷ نیز به این روش‌ها تعلق دارند [۲۳]. در روش الکتروفورز مویین، آنالیت‌ها (مواد مورد تجزیه) تحت تأثیر میدان الکتریکی از طریق محلولهای الکتروولتی مهاجرت می‌کنند. آنالیت‌ها می‌توانند با توجه به تحرک یونی و یا تقسیم شدن به یک فاز متناوب بواسطه تعاملات غیر کووالانسی، جدا شوند.

۸ محلول‌های بافر شده

یک محلول بافر (بافر یون هیدروژن) یک محلول آبی و حاوی مخلوط اسید ضعیف و باز مزدوج آن است و یا برعکس، زمانی که مقدار کمی اسید قوی یا پایه به آن افزوده می‌شود pH آن تغییرات خیلی کم دارد. محلول‌های بافر به عنوان وسیله‌ای برای حفظ pH در مقدار تقریباً ثابت در طیف گسترده‌ای از کاربردهای شیمیایی استفاده می‌شود. در طبیعت، سیستم‌های بسیاری برای تنظیم pH با استفاده از بافر وجود دارد. برای مثال، سیستم بافر بیکربنات که

که به طور معمول در آزمایشگاه انجام می‌شوند، بر روی یک تراشه تنها، به منظور افزایش کارایی و تحرک و همچنین کاهش حجم نمونه و واکنش، کوچک شده‌اند.

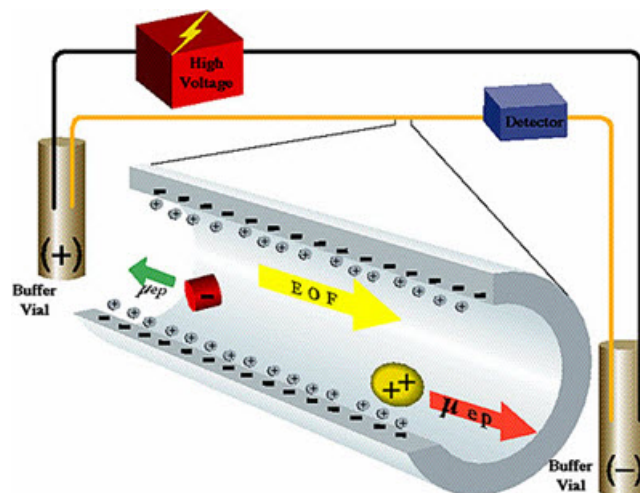
۴ دی الکتروفورز

دی الکتروفورز پدیده‌ای است که در آن نیرویی بر روی یک ذره دی الکتریک در معرض میدان الکتریکی غیریکنواخت، اعمال می‌شود [۱۶] و [۱۸-۲۲]. این نیرو نیازی به ذرات باردار شده الکتریکی ندارد. تمام این ذرات، در حضور میدان‌های الکتریکی، فعالیت دی الکتروفورتیک نشان می‌دهند. با این حال، شدت نیرو شدیداً به خواص الکتریکی محیط و ذرات، شکل و اندازه ذرات و همچنین فرکانس میدان الکتریکی وابسته است.

۵ الکترواسموس

جریان الکترو اسموتیک، حرکت مایع القا شده توسط یک پتانسیل اعمالی در مواد متخلخل، لوله مویین، غشاء، میکروکانال یا هر مجرای سیال دیگری است. از آنجا که سرعت‌های الکترواسموتیک مستقل از اندازه کانال است، تا زمانی که دو لایه الکتریکی^۱ بسیار کوچکتر از مقیاس طول مشخص کانال باشد، جریان الکترواسموتیک اثر کمی خواهد داشت (شکل ۲).

جریان الکترواسموتیک به صورت یک جریان یکنواخت با شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌ها عمل می‌کند، یعنی سرعت جریان از مقدار صفر بر روی دو دیواره شروع شده و در ناحیه دوگانه الکتریکی با شیب نسبتاً زیادی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت در توده سیال برسد. جریان الکترواسموتیک در کانال‌های کوچک خیلی مهم است. این جریان جزء ضروری در تکنیک‌های جداسازی شیمیایی، به ویژه الکتروفورز مویین^۲ است. جریان الکترواسموتیک می‌تواند در آب طبیعی فیلتر نشده و همچنین محلول‌های بافر شده^۳ وجود داشته باشد.



شکل ۲: جریان الکترواسموتیک (EOF)

از موارد استفاده این جریان می‌توان به پمپ الکترواسموتیک اشاره کرد که برای تولید جریان سیال یا فشار با استفاده از میدان الکتریکی به کار

¹Electrical double layer ²Capillary ³Buffered solutions ⁴Diffuse layer ⁵Capillary Zone Electrophoresis (CZE) ⁶Iso-tacho-phoresis ⁷Micellar electro-kinetic chromatography

برای تنظیم pH خون استفاده می‌شود.

۹ الکتروروتیشن

یک طرف پیشران، کاتدی وجود دارد که گاز را آنچنان تحت بمباران الکترونی قرار می‌دهد تا گاز مزبور باردار شده یا تبدیل به پلاسما شود. سپس پلاسما به سمت صفحه مشبک انتهای موتور هدایت می‌شود. نخستین صفحه، غلاف نام دارد و صفحه دوم را نیز شتابدهنده می‌نامند. انرژی پتانسیل پلاسما زمانی که از این دو صفحه عبور می‌کند، یک میدان الکترواستاتیکی ایجاد می‌کند و همین میدان نیز پلاسما را با شتاب زیادی به بیرون از موتور هل می‌دهد. پس از خروج از موتور، پلاسما تحت بمباران الکترونی کاتد دیگری بیرون از محفظه موتور قرار می‌گیرد تا تعادل مابین یون‌های مثبت و منفی در پلاسما برقرار گردد و بدین وسیله از بازگشت مجدد گاز به درون موتور جلوگیری شود. موتورهای الکترومگنتیک، بر اساس قانون لورنتز کار می‌کنند. نیروی اصلی که ذرات باردار را به بیرون پرتاب می‌کند این بار از طریق میدان الکتریکی تأمین می‌شود که عمود بر آن، یک میدان مغناطیسی متناوب نیز وجود دارد. مثال ساده‌ای از این موتورها، پیشران تپنده القائی نام دارد. این موتور اساساً یک مخروط است که یک سیم پیچ القاگر به دور آن پیچیده شده و تعدادی باتری که به سیم پیچ متصلند که در نهایت یک آهن‌ربای الکتریکی بزرگی را تشکیل می‌دهند. در حالی که سیم پیچ به جریان الکتریسیته متصل می‌شود، گاز به درون مخروط پمپ می‌شود. همین امر باعث می‌شود تا یک نیروی مغناطیسی در نوک مخروط (که خروجی موتور است) ایجاد شود و توأم در درون مخروط یک جریان الکتریکی در جهت مخالف جریان اولیه بوجود آید. این جریان گاز درون مخروط را باردار کرده و ذرات باردار مثبت، بواسطه جریان دوم که عمود بر نیروی مغناطیسی است، به بیرون رانده می‌شوند. پیشران‌های الکتریکی تا برابر کارایی بیشتری در مقایسه با پیشران‌های شیمیایی دارند. از نظر زمان عملکرد نیز این پیشران‌ها چندین برابر موتورهای شیمیایی کار می‌کنند. پیشران‌های شیمیایی تنها در حدود چند دقیقه می‌توانند کار کنند در حالی که پیشران‌های الکتریکی قادرند چندین هزار ساعت بطور مداوم عمل نمایند.

۱۱ ژنراتور ام.اچ.دی و ای.اچ.دی

۱.۱۱ ژنراتور ام.اچ.دی

ژنراتور مورد استفاده در فرایند ام.اچ.دی، ژنراتور ام.اچ.دی نامیده می‌شود. این ژنراتور شبیه موتور موشک می‌باشد که با آهن ربای بزرگی احاطه شده است و هیچ قطعه متحرکی ندارد و رساناهای واقعی با سیالات رسانا جایگزین شده‌اند. سیال جاری در این ژنراتور، باید رسانای الکتریسیته باشد که محدود به فلزات مذاب، گازهای یونیزه شده داغ (پلاسما) و یا الکترولیت‌های قوی می‌شود. شرط اساسی انتخاب سیال، رسانایی الکتریکی بالا و قابلیت یونیزه شدن می‌باشد.

در حال حاضر تحقیقات تئوری و تجربی زیادی برای امکان‌سنجی استفاده از ژنراتور ام.اچ.دی در صنایع هوافضا مانند هواپیماهای ماوراء صوت و ماهواره‌ها در حال انجام هستند. وسایل نقلیه هوایی مانند شاتل فضایی، هم سوخت و هم اکسید کننده را با خود حمل می‌کنند. اگر یک اکسید کننده قوی خارجی (مانند جو زمین) استفاده شود، نیاز به حمل اکسید کننده روی وسیله

الکتروروتیشن حرکت دایره‌ای یک ذره پلاریزه الکتریکی است. این حرکت می‌تواند همانند لغزش^۱ یک موتور الکتریکی از یک تأخیر فاز بین میدان الکتریکی چرخشی اعمالی و فرایندهای آرام‌سازی مربوطه^۲ بوجود آید. یک موتور الکتریکی در روتور خود انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. برای القای جریان در روتور، اختلاف سرعتی بین سرعت میدان دوار و سرعت گردش روتور به وجود می‌آید. در غیر این صورت میدان دوار نسبت به روتور امکان حرکت نخواهد داشت و هادی‌های روتور شار میدان تولید شده توسط استاتور را قطع نکرده و در نتیجه ولتاژی در روتور القا نخواهد شد. این اختلاف سرعت بین سرعت میدان دوار و سرعت حرکت روتور در اصطلاح لغزش نامیده می‌شود.

۱۰ پیشرانه یونی

پیشرانه یونی^۳ نام نوعی پیشرانه الکتریکی مورد استفاده در پیشران فضایی است که قرار است به منظور شتاب بیشتر برای ماموریت‌های طولانی فضایی بر روی محموله‌های فضایی مانند فضاپیماها و ماهواره‌های آینده نصب شود. این پیشرانه با شتاب دادن به پلاسما (گاز باردار)، نیروی پیشران وسایل نقلیه فضایی را تأمین می‌کند. موتورهای پیشران یونی به این دلیل کار می‌کنند که در محفظه احتراق موتور می‌توان پلاسما بوجود آورد. یعنی الکتریسیته باید در داخل محفظه جریان داشته باشد. چون هوا عایق است و از جریان الکتریسیته جلوگیری می‌کند، بنابراین پیشران یونی زمانی رخ می‌دهد که هیچ فشار هوایی در محفظه وجود نداشته باشد و یا اینکه فشار هوا خیلی ناچیز باشد. فشار هوا مهم است؛ زیرا یک گاز تنها در فشارهای پایین یونیزه یا باردار می‌شود. این به آن دلیل است که هر چه هوا یا گاز بیشتری در درون محفظه باشد، الکترونیایی که باید اتمها را یونیزه کنند به جای برخورد با اتمها، به مولکولهای هوا برخورد می‌کنند. خلا یک فضای کاملاً تهی است. اگر هوایی وجود نداشته باشد، هیچ فشار هوایی نیز وجود ندارد تا الکترونها را متوقف سازد. هر وسیله‌ای برای حرکت سوخت حمل می‌کند، موتورهای یونی روشی ارائه می‌کنند که در آن سفینه‌های فضایی برای حرکت در فضا، برخلاف موشکهای مرسوم، نیازی به حمل مقادیر زیاد سوخت ندارند. پیشرانه یا موتورهای یونی در دو دسته قرار می‌گیرند: الکترواستاتیکی‌ها و الکترومگنتیک‌ها. هر کدام از این موتورها، از اصول متفاوت نیروی الکترومغناطیس برای ایجاد پیشران یونی استفاده می‌کنند. موتورهای الکترواستاتیکی، بر اساس قانون کولن کار می‌کنند، بر اساس این قانون، یک ذره باردار متحرک، میدان الکتریکی ایجاد می‌کند. میزان قدرت این میدان الکتریکی، همان چیزی است که گاز پیشران را در این نوع از موتورها شتاب می‌دهد. رایج ترین نوع این موتورهای یونی، پیشران‌های مشبک الکترواستاتیکی است که نسبتاً از طراحی ساده‌ای برخوردارند. در قدم اول، سوخت مورد نیاز، یک گاز خنثی همانند زنون و یا کریپتون است. در

¹Slip ²Respective relaxation processes ³Ion thruster

الکتریکی بر حسب ولت بر متر ($V m^{-1}$)، \vec{H} و \vec{D} به ترتیب میدان‌های القایی برای میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی، q چگالی بار الکتریکی بر حسب کولن بر مترمکعب ($C m^{-1}$) و \vec{J} بردار چگالی جریان الکتریکی بر حسب آمپر بر مترمربع ($A m^{-2}$) هستند. میدان‌های القایی \vec{H} و \vec{D} بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

در دو معادله بالا، μ و ϵ گذردهی مغناطیسی و الکتریکی هستند. در مطالعه اندرکنش بین میدان جریان سیال و میدان الکترومغناطیسی مهم است که چگالی جریان بر اساس القاء الکترومغناطیسی فارادی بدست آید.

۲.۱۲ معادلات حاکم بر ای.اچ.دی

ای.اچ.دی به عنوان یک تکنیک فعال با اثرات متقابل بین میدانهای الکتریکی و جریان در ارتباط است. هنگامی که یک ولتاژ بالا به یک الکتروود تیز اعمال می‌شود، هوا یونیزه می‌شود و یون‌ها به سمت کلکتور جذب می‌شوند. انتقال یون‌های تزریقی از الکتروود تیز (منتشرکننده) به سمت الکتروود کلکتور، موجب می‌شود که یون‌ها، ممنتوم خود را بوسیله ضربه برخورد، به مولکول‌های خنثی انتقال دهند. در نتیجه یک جریان فشرده مولکول‌های یونیزه شده هوا با نام باد کرونا تولید می‌شود. باد کرونا، لایه مرزی بر روی سطح را مختل می‌کند و می‌تواند میزان انتقال حرارت بین سطح و هوای محیط آن را افزایش دهد.

۱.۲.۱۲ معادلات میدان الکتریکی

معادلات حاکم بر نیروی ای.اچ.دی در واحد حجم (Fe) بوسیله یک میدان الکتریکی E که با معادله ۷ داده می‌شود تولید می‌شود [۲۵]:

$$\vec{F}_e = \rho_c \vec{E} - \frac{1}{4} \vec{E} \nabla \epsilon + \frac{1}{4} \nabla \left[\vec{E} \cdot \rho \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right) \right] \quad (7)$$

جملات سمت راست معادله بالا به ترتیب نیروهای کولن (نیروی الکترواستاتیک یا اثر متقابل کولن که عبارت است از: جاذبه یا دافعه ذرات یا اشیاء به دلیل بار الکتریکی‌شان)، الکترواستریکتیو^۲ (الکترواستریکتیو خاصیتی از مواد نارسانای الکتریکی یا دی‌الکتریک‌ها که موجب تغییر این مواد در اثر اعمال میدان الکتریکی می‌شود) و الکتروفورتیک^۳ (الکتروفورز عبارت است از حرکت ذرات پراکنده نسبت به سیال تحت تاثیر میدان الکتریکی یکنواخت فضایی هستند. در صورتی که گذردهی^۴ الکتریکی (ϵ) ثابت فرض شود، نیروهای الکترواستریکتیو و الکتروفورز ناچیز و قابل صرفنظر بوده و نیروی حجمی الکتریکی به نیروی کولن ساده می‌شود. بنابراین معادلات حاکم ای.اچ.دی به شکل زیر نوشته می‌شوند

معادله پواسون:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_c}{\epsilon_s} \quad (8)$$

حذف می‌شود و وسایل نقلیه پرتاب آینده، در کسری از مصرف سوخت کل، می‌توانند بار بزرگتری در مدار حمل کنند. به همین دلیل، ناسا در حال حاضر روی استفاده از موتورهای مکنده هوا تحقیق می‌کند تا بتواند اولین مرحله از دو مرحله سیستم‌های پرتاب مافوق صوت را تقویت کند [۲۴]. حذف نیاز به حمل یک اکسیدکننده روی وسیله نقلیه، منجر به کاهش وزن کلی وسیله در هنگام پرتاب آن‌ها می‌شود.

۲.۱۱ ژنراتور ای.اچ.دی

بطور کلی، پدیده ای.اچ.دی به تبدیل مستقیم انرژی الکتریکی به انرژی جنبشی و برعکس مربوط می‌شود. در مرحله اول، میدان‌های الکترواستاتیک شکل گرفته باعث ایجاد فشار هیدرواستاتیک یا حرکت در محیط دی‌الکتریک می‌شوند. اگر این محیط، سیال باشد، یک جریان تولید می‌شود و اگر دی‌الکتریک خلاء یا جامد باشد، هیچ جریانی تولید نمی‌شود. چنین جریانی را می‌توان برای به حرکت در آوردن بارهای الکتریکی آزاد، به سمت الکتروودها با قطب مخالف هدایت کرد. در چنین شرایطی، ساختار حرکتی به عنوان یک موتور الکتریکی عمل می‌کند. زمینه‌های کاربردی ای.اچ.دی، یونیزه کننده رایج هوا، موتورهای^۱ و سیستم‌های خنک کننده ای.اچ.دی هستند. در مرحله دوم، حالت بر عکس اتفاق می‌افتد. یک جریان قوی از محیط داخل یک میدان الکترواستاتیک شکل گرفته، انرژی را به سیستم اضافه می‌کند که به وسیله الکتروود به عنوان یک اختلاف پتانسیل برداشته می‌شود. در این صورت، ساختار به عنوان یک ژنراتور الکتریکی عمل می‌کند.

۱۲ معادلات حاکم

۱.۱۲ معادلات ماکسول

در حالت کلی، جریان الکتریکی القایی و نیروی لورنتز تمایل دارند که با مکانیزم به وجود آورنده خود مخالفت کنند. از اینرو، حرکت‌های منجر به القای الکترومغناطیس به صورت سیستماتیک توسط نیروی لورنتز متوقف می‌شوند. القای الکتریکی حتی توسط میدان مغناطیسی متغیر با زمان نیز ایجاد می‌شود. معادلات ماکسول در الکترومغناطیس همان اهمیتی را دارد که قوانین حرکت نیوتن در مکانیک کلاسیک دارند. این معادلات، چگونگی ایجاد شدن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی توسط بارها و جریانات الکتریکی و نیز پیدایش یکی از این میدان‌ها توسط تغییر میدان دیگر را توصیف می‌کنند. میدان‌های الکترومغناطیس توسط معادلات ماکسول به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (4)$$

در معادلات بالا، \vec{B} میدان مغناطیسی بر حسب تسلا (T)، \vec{E} میدان

¹Thrusters ²Electro-strictive ³Electrophoretic ⁴Permittivity

چگالی بار الکتریکی فضایی:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (9)$$

میدان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (10)$$

$$\vec{j} = \rho_c \beta \vec{E} + \rho_c \vec{u} + D_e \nabla \rho_c \quad (11)$$

جملات سمت راست معادله ۱۱ به ترتیب، رانش^۱، جابجایی و پخش بارهای الکتریکی هستند. جمله جابجایی بار الکتریکی $\rho_c \vec{u}$ در حدود ۲ مرتبه از جمله رانش یونی $\rho_c \beta \vec{E}$ کوچکتر می‌باشد [۲۶]. لازم به ذکر است که پخش بارهای الکتریکی $D_e \nabla \rho_c$ در جریان‌های یونی ماکرو ناچیز است، اما در جریان‌های یونی در مقیاس میکرو قابل توجه می‌باشد [۲۷]. بر اساس این فرضیات، چگالی بار الکتریکی فضایی به شکل زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (-\rho_c \beta \nabla \varphi) = 0 \quad (12)$$

نیروی کولن $\rho_c \vec{E}$ در معادلات ممنتوم به عنوان یک جمله چشمه عمل می‌کند.

۲.۲.۱۲ معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت در ای.اچ.دی

در این بخش، معادلات حاکم بر جریان سه بعدی سیال و انتقال حرارت شامل معادلات پیوستگی، ممنتوم به اضافه جمله چشمه نیروی الکتروهایدرودینامیکی (Fe) و انرژی برای یک جریان تراکم پذیر بیان می‌شود:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (13)$$

معادله ممنتوم:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) + \nabla p - \nabla \cdot \tau = F_e \quad (14)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial \left[\rho \left(e_i + \frac{1}{\gamma} u^2 \right) \right]}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \left(e_i + \frac{1}{\gamma} u^2 \right) \mathbf{U} \right] = \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \tau + \lambda \nabla T - P\mathbf{U}) \quad (15)$$

جمله $P \nabla \cdot \mathbf{U}$ در معادله انرژی، کار انجام شده بوسیله انبساط یا انقباض و تبدیل بازگشت پذیر بین انرژی جنبشی و گرمایی می‌باشد که برای گازها و مایعات تراکم پذیر مهم بوده ولی برای مایعات تراکم ناپذیر قابل چشم پوشی است.

۳.۱۲ معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت در

ام.اچ.دی

در این بخش، معادلات حاکم بر جریان سه بعدی سیال و انتقال حرارت به اضافه جملات چشمه الکترومغناطیسی شامل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی برای یک جریان تراکم پذیر بیان می‌شود:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (16)$$

معادله ممنتوم:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) + \nabla p - \nabla \cdot \tau = j \times B \quad (17)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial \left[\rho \left(e_i + \frac{1}{\gamma} u^2 \right) \right]}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \left(e_i + \frac{1}{\gamma} u^2 \right) \mathbf{U} \right] = \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \tau + \lambda \nabla T - P\mathbf{U}) + j \cdot E \quad (18)$$

در معادلات بالا $j \times B$ نیروی حجمی الکترومغناطیسی لورنتز و $j \cdot E$ تولید گرمای ناشی از اتلافات اهمی هستند. هر گاه جریان در سرتاسر یک رسانا با سطح مقطع A به طور یکنواخت توزیع شده باشد، بزرگی چگالی جریان برای تمام نقاط واقع بر روی مقطع عبارت است از $j = I/A$. چگالی جریان الکتریکی از قانون اهم تعمیم یافته برای اثر هال الکترون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$j = \sigma (E + u \times B) - (\beta) (j \times b) \quad (19)$$

معادله پواسون نیز از ترکیب معادلات پیوستگی جریان الکتریکی ($\nabla \cdot j = 0$) و ۱۹، به شکل زیر بدست می‌آید:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = -\sigma [\nabla \cdot (u \times B) + \beta B \nabla \cdot u] \quad (20)$$

در صورتی که رسانایی الکتریکی پلاسما (σ) ثابت و جریان بدون اثر هال (β) فرض شود: معادله پواسون به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\nabla^2 \varphi = \nabla \cdot (u \times B) \quad (21)$$

۱۳ کارهای انجام شده

۱.۱۳ ای.اچ.دی

۱) افزایش انتقال حرارت (بطور مثال، مبدل‌های حرارتی) با استفاده از روش ای.اچ.دی

افزایش انتقال حرارت از سال ۱۹۲۰ علاقمندی گسترده‌ای را در تحقیقات حوزه مهندسی حرارتی به خود جذب کرده است. روشهای افزایش انتقال حرارت را در دو دسته فعال و غیر فعال می‌توان تقسیم بندی نمود [۲۸]. روش ای.اچ.دی در مقایسه با سایر روشهای افزایش انتقال حرارت، علیرغم ملاحظات ایمنی آن، دارای مزایای اصلی از جمله: ساخت ساده، پاسخ سریع و سهولت کنترل، مصرف پایین برق و هزینه‌های کم تعمیر و نگهداری به دلیل

¹Drift

دارد. در این پمپها، ذرات خنثی و نامتقارن میدان الکتریکی جداسازی شده و دوباره ترکیب می‌شوند [۲۵].

۲.۱۳ ام.اچ.دی

استفاده از تکنولوژی ام.اچ.دی روی هواپیما از سال ۱۹۲۰، توجه زیادی را جلب کرده است برجسته ترین تحقیق، کنترل موج ضربه‌ای ام.اچ.دی و مدیریت حرارت در جلوی هواپیما [۳۸، ۳۹] بود که از جمله می‌توان به کار لپوشکینا و همکاران [۴۰] اشاره کرد که اثر میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در جریان پلاسما گزنون روی پیکربندی موج ضربه‌ای در ورودی یک دیفیوزر مافوق صوت را با استفاده از روش شلرین بصورت تجربی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که میدانهای خارجی اگر به قسمت ورودی دیفیوزر اعمال شوند، حداکثر تأثیر را خواهند داشت. از دیگر تحقیقات انجام شده در باره ام.اچ.دی، ژنراتور ام.اچ.دی می‌باشد که با استفاده از روش تولید توان الکتریکی ام.اچ.دی و بدون هر قطعه متحرک مکانیکی، انرژی حرارتی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. با توجه به وزن نسبتاً کم این ژنراتورها در مقایسه با ژنراتورهای متعارف، در سالهای اخیر پیشنهادات زیادی برای استفاده از آنها در وسایل گوناگون مانند هواپیماها و فضاپیماها با سرعتهای مافوق صوت و ماوراءصوت شده است. همچنین، در گذشته در مورد هواپیماهای با موتور رم جت یا اسکرم جت با سرعتهای ماوراءصوت یا مافوق صوت نیز تحقیقات زیادی انجام شده است که بطور نمونه می‌توان به کارهای فرشتات و همکاران [۴۱] در بررسی امکان استفاده از سامانه‌های ام.اچ.دی در هواپیماهای ماوراءصوت با عدد ماخ ۶، اینویی و همکاران [۴۲] در شبیه‌سازی عددی ژنراتور ام.اچ.دی دیسکی، دو بعدی استوانه‌ای، مافوق صوت، ایتر و ایشیکاوا [۴۳] در بررسی اثرات پلاسما ضعیف یونیزه شده با دما و سرعت بالا نزدیک آند ژنراتور فارادی ام.اچ.دی اشاره کرد.

۱۴ نتیجه‌گیری

ای.اچ.دی مطالعه دینامیک سیالات باردار و رسانای الکتریکی می‌باشد و از موارد استفاده آن می‌توان پیشراشه یونی در صنایع هوافضا و میکروپمپ الکتریکی در صنایع مختلف را نام برد. به عنوان مثال با استفاده از جریان الکترواسموتیک که یکی از مکانیزمهای فرآیند ای.اچ.دی می‌باشد می‌توان به عنوان میکروپمپ الکترواسموتیک برای خنک کردن رایانه‌های موجود در وسایل پرنده هوایی بهره برد که آن هم منجر به بهبود مراحل خنک‌کاری رایانه و همچنین کاهش وزن این وسایل خواهد شد. هر چند مطالعات تجربی زیادی در مورد الگوی جریان ای.اچ.دی انجام شده است و نتایج آنها نسبتاً قابل اعتماد هستند، ولی کاری بسیار دشوار، گران و زمان‌بر هستند. ام.اچ.دی مطالعه سیالات رسانای الکتریکی جریان یافته در میدانهای مغناطیسی اعمالی می‌باشد. ژنراتور ام.اچ.دی نیز ژنراتوری است که بدون هیچ قطعه مکانیکی متحرکی، با استفاده از فرآیند ام.اچ.دی، برق تولید می‌کند. با توجه به رشد روز افزون تقاضای برق ارزان و نظر به محدود بودن سوختهای فسیلی، علاوه بر مشکلات دیگر آن همچون آلاینده‌گی محیط زیست، نیاز به استفاده از روشهای دیگر تولید برق هر روز بیشتر احساس می‌شود. ضمناً باید به این نکته اشاره

عدم وجود قطعات متحرک می‌باشد. میرزایی و صفار اول [۲۹] افزایش انتقال حرارت، افت فشار و مصرف برق در یک حلقه را با استفاده از روش هدایت ای.اچ.دی، بصورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در محدوده مورد نظر، انتقال حرارت تا ۵۰٪ در مقایسه با نبود میدان الکتریکی، افزایش می‌یابد و این روش در اعداد رینولدز پایین (بین ۵ تا ۵۰) مؤثرتر است.

۲ پمپ ای.اچ.دی

پمپ‌های ای.اچ.دی جزء پمپ‌های غیرمکانیکی بوده و هیچ بخش حرکتی ندارند، بنابراین می‌توانند با مقاومت بیشتری نسبت به تنش‌های حرارتی کار کنند. این پمپ‌ها با تزریق یا تولید یون‌ها در مجاورت الکترودها در یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا ایجاد سیال دی‌الکتریک می‌کنند. تحت شدت بالای میدان الکتریکی، بارهای الکتریکی آزاد، شروع به حرکت به سمت الکترودها با قطب مخالف می‌کنند. تعامل ذرات باردار شده با مولکول‌های سیال، یک نیروی درگ کوچک ایجاد می‌کند که منجر به ایجاد یک جریان خالص در امتداد کانال می‌شود. سه روش مختلف پمپاژ ای.اچ.دی، درگ یونی^۱، القایی^۲ و هدایت [۳۰] توسعه یافته است. استواتزر [۳۱، ۳۲] با استفاده از مفهوم ام.اچ.دی، یک کلکتور صاف و یک فرستنده شتابی را به یک منبع ولتاژ بالا متصل کرد. لبه تیز الکترودها بارهای الکتریکی آزاد را به سیال تزریق کرده و تحت تأثیر میدان الکتریکی، حامل‌های بار الکتریکی، سیال مجاور را به سمت کلکتور کشانده و سیال در حال حرکت را تنظیم کرد [۳۳]. این پدیده بنام پمپاژ درگ یونی شناخته می‌شود. ملچر [۳۴] روش دیگری از القاء سیال با استفاده از قوانین ای.اچ.دی را معرفی کرد که نیازی به تزریق مستقیم بار الکتریکی یا هر ذره خارجی دیگری به سیال نداشت و آن را پمپ القایی ای.اچ.دی نامید [۳۵]. اگر چه پمپ‌های درگ یونی یک چشم انداز امیدوار کننده برای تولید نرخهای بالای جریان را نشان می‌دهند، ولی اثرات تزریق بار الکتریکی به تدریج منجر به سیر نزولی^۳ خواص مایع می‌شود [۳۰]. برخلاف پمپ‌های درگ یونی، در پمپ القایی، برای تحریک سیال هیچ حامل بار و یا ذره اضافی مورد نیاز نیست. بارهای مثبت و منفی الکتریکی سیالات با رسانایی پایین در تعادل هستند. این تعادل را می‌توان با یک ناپیوستگی یا گرادیان در رسانایی الکتریکی سیال به هم زد. ناسازگاری در رسانایی می‌تواند منجر به سطح مشترک بین دو مایع مختلف یا یک گرادیان دما در سراسر سیال شود. در پمپاژ القایی، با توجه به قطبیت ولتاژ اعمال شده، گرادیان رسانایی به شکل‌گیری هر دو بار الکتریکی مثبت یا منفی بستگی دارد. پس از تشکیل بارهای الکتریکی آزاد، برای دفع یا جذب آنها به الکترودها مجاور، از امواج الکتریکی متوالی استفاده می‌شود. پمپ‌های القایی از این بارهای الکتریکی آزاد استفاده کرده و آنها را در امتداد کانال هل می‌دهند. حرکت این بارها در داخل سیال یک نیروی درگ اعمال کرده و سیال در حال حرکت را می‌راند. برای ایجاد امواج الکتریکی در حال حرکت، الکترودها در امتداد کانال در یک آرایش متوالی قرار می‌گیرند [۳۳]. چند سال بعد، آتن و یعقوبی [۳۶] نوع دیگری از پمپ ای.اچ.دی را معرفی کردند که به پمپ هدایتی معروف است. این پمپ بر خلاف پمپ‌های درگ یونی [۳۷]، روش هدایت، خواص سیال عامل را تغییر نمی‌دهد و در مقایسه با دو پمپ دیگر، مصرف انرژی کمتری

¹Ion-drag ²Induction ³Deterioration

- [17] Bruus, Henrik. *Theoretical microfluidics. oxford master series in condensed matter physics*. Oxford University Press, 2007.
- [18] Pohl, Herbert Ackland. Dielectrophoresis. *The behavior of neutral matter in nonuniform electric fields*, 1978.
- [19] H. Morgan, N. Green. Ac electro-kinetics: Colloids and nano-particles. *Research Studies Press*, 2002.
- [20] Hughes, Michael Pycraft. *Nanoelectromechanics in engineering and biology*. CRC press, 2002.
- [21] Jones, T. B. Electro-mechanics of particles. *Cambridge University Press.*, 1995.
- [22] H. C. Chang, L. Yao. Electro-kinetically driven microfluidics and nano-fluidics. 2009.
- [23] Kemp, Graham. Capillary electrophoresis: a versatile family of analytical techniques. *Biotechnology and applied biochemistry*, 27(1):9-17, 1998.
- [24] Parent, B. Weakly-ionized air flow lab. *Department of Aerospace Engineering*.
- [25] Moayedi, Hesam, Amanifard, Nima, Deylami, Hamed Mohaddes, and Dolati, Farid. Numerical investigation of using micropolar fluid model for ehd flow through a smooth channel. *Journal of Electrostatics*, 87:51-63, 2017.
- [26] Moss, Richard Alan and Grey, Jerry. *Heat transfer augmentation by steady and alternating electric fields*. Ph.D. thesis, Princeton University, 1966.
- [27] Go, David B, Garimella, Suresh V, and Fisher, Timothy S. Numerical simulation of microscale ionic wind for local cooling enhancement. in *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, 2006. ITherm'06. The Tenth Intersociety Conference on*, pp. 45-53. IEEE, 2006.
- [28] Bergles, Arthur E. Techniques to augment heat transfer. *Handbook of heat transfer. (A 74-17085 05-33) New York, McGraw-Hill Book Co., 1973.*, pp. 10-11, 1973.
- [29] Mirzaei, Mostafa and Saffar-Avval, Majid. Enhancement of convection heat transfer using ehd conduction method. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 93:108-118, 2018.
- [30] Seyed-Yagoobi, Jamal. Electrohydrodynamic pumping of dielectric liquids. *Journal of Electrostatics*, 63(6-10):861-869, 2005.
- [31] Stuetzer, Otmar M. Ion drag pressure generation. *Journal of Applied physics*, 30(7):984-994, 1959.
- [32] Stuetzer, Otmar M. Ion drag pumps. *Journal of Applied Physics*, 31(1):136-146, 1960.
- [33] J. Seyed-Yagoobi, J. C. Chato, J.M. Crowley P.T. Krein. Induction electrohydrodynamic pump in a vertical configuration: part 1—theory. *Journal of Heat Transfer*, 111:664-669, 1989.
- [34] Melcher, J. R. Traveling-wave induced electroconvection. *Physics of Fluids*, 9(8):1548-1555, 1966.
- [35] Feng, Yinshan and Seyed-Yagoobi, Jamal. Understanding of electrohydrodynamic conduction pumping phenomenon. *Physics of fluids*, 16(7):2432-2441, 2004.
- کرد که در هواپیماها و فضاپیماها با توجه به استفاده از موتورهای رم جت و اسکرم جت که هیچ قطعه متحرکی برای تولید برق ندارند و همچنین لزوم امکان بالا بردن سرعت آنها به سرعتی بالاتر از ۴ ماخ، ضرورت استفاده از فرآیند ام.اچ.دی ژنراتور ام.اچ.دی برای تولید برق و شتاب دهنده ام.اچ.دی برای بالا بردن سرعت گازهای خروجی وسایل پرنده هوافضایی، بیشتر احساس می شود.
- مراجعه**
- [1] Wilson, Jack, Perkins, Hugh D, and Thompson, William K. An investigation of ionic wind propulsion. 2009.
- [2] Masuyama, Kento and Barrett, Steven RH. On the performance of electrohydrodynamic propulsion. *Proc. R. Soc. A*, 469(2154):20120623, 2013.
- [3] Corke, Thomas C, Enloe, C Lon, and Wilkinson, Stephen P. Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control. *Annual review of fluid mechanics*, 42:505-529, 2010.
- [4] Opaits, Dmitry et al. Dielectric barrier discharge plasma actuator for flow control. 2012.
- [5] Nelson, Robert, Corke, Thomas, Othman, Hesham, Patel, Mehul, Vasudevan, Srikanth, and Ng, Terry. A smart wind turbine blade using distributed plasma actuators for improved performance. in *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 1312, 2008.
- [6] D. Carmein, D. White. Electro-hydrodynamic wind energy system, 2014. U. S. Patent 2014/0292140 A1.
- [7] Lyklema, J. Fundamentals of interface and colloid science. volume 2: Solid-liquid interfaces. with special contributions by a. de keizer, bh bijsterbosch, gj fleer and ma cohen stuart. 1995.
- [8] Hunter, RJ. Behaviour of colloidal dispersions. *Foundations of colloid science*, 1:72-73, 1989.
- [9] S. S. Dukhin, B.V. Derjaguin. electrokinetic phenomena. *J. Willey and Sons*, 1974.
- [10] Russel, WB, Saville, DA, and Schowalter, WR. Colloidal dispersions cambridge univ. *Press, Cambridge*, 1989.
- [11] H. R. Kruyt, Colloid Science. *Irreversible systems*, 1, 1952.
- [12] Dukhin, Andrei S. *Ultrasound for Characterizing Colloids Particle Sizing, Zeta Potential Rheology*. Elsevier, 2002.
- [13] Wall, Staffan. The history of electrokinetic phenomena. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15(3):119-124, 2010.
- [14] Thompson, C. The antigravity underground. *Wired Magazine*, 2003.
- [15] Chang, Hsueh-Chia and Yeo, Leslie Y. Electrokinetically driven microfluidics and nanofluidics. 2010.
- [16] Kirby, Brian J. *Micro-and nanoscale fluid mechanics: transport in microfluidic devices*. Cambridge university press, 2010.

- [36] Atten, P and Seyed-Yagoobi, J. Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry-theory. in *Dielectric Liquids, 1999. (ICDL'99) Proceedings of the 1999 IEEE 13th International Conference on*, pp. 231-234. IEEE, 1999.
- [37] Bryan, James E and Seyed-Yagoobi, Jamal. An experimental investigation of ion-drag pump in a vertical and axisymmetric configuration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(2):310-316, 1992.
- [38] Jr., EL Resler. The prospects for magneto-aerodynamics. *Journal of the Aerospace Sciences*, 25(4):235-245, 1958.
- [39] Ziemer, Richard W. Experimental investigation in magneto-aerodynamics. *ARS Journal*, 29(9):642-647, 1959.
- [40] Lapushkina, TA, Bobashev, SV, Vasil'eva, RV, Erofeev, AV, Ponyaev, SA, Sakharov, VA, and Van Wie, D. Influence of electric and magnetic fields on the shock wave configuration at the diffuser inlet. *Technical Physics*, 47(4):397-405, 2002.
- [41] Fraishtadt, VL, Kuranov, AL, and Sheikin, EG. Use of mhd systems in hypersonic aircraft. *Technical Physics*, 43(11):1309-1313, 1998.
- [42] Inui, Y, Ito, H, and Ishida, T. Two dimensional simulation of closed cycle disk mhd generator considering nozzle and diffuser. *Energy conversion and management*, 45(13-14):1993-2004, 2004.
- [43] Itoh, Kazuya and Ishikawa, Motoo. Three-dimensional analyses of phenomena near anode of mhd generator with high temperature, high velocity, and strong mhd interaction. in *32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, p. 2810, 2001.