

پیشران‌ش الکتروآئرو‌دینامیک - با قدرت ماکسول و کولن

بینش‌های ارائه‌شده در این مقاله از دهه‌ها آزمایش انجام‌شده توسط نویسندگان بین سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ ناشی می‌شود، که پیشران‌ش الکتروآئرو‌دینامیک را با طیف گسترده‌ای از منابع انرژی (جریان متناوب و مستقیم)، هندسه‌های الکترو، و انواع ساطع‌کننده‌های یون کاوش می‌کرد. این تحقیقات با ساخت روتور ۸۰ سانتی‌متری نشان‌داده‌شده در زیر به اوج رسید، که به سرعت چرخشی ۱۸ دور در دقیقه با کمتر از ۶ کیلوولت و تنها حدود ۱۰۰ میلی‌وات توان الکتریکی ورودی دست یافت.

این کمپین تجربی آشکار کرد که عملکرد به مراتب بیشتر به توزیع و هندسه میدان‌های الکترواستاتیک بستگی دارد تا به حرکت هوا یا جریان یون خود. مشاهدات پایه‌ای برای بازسازی نظری پیشران‌ش الکتروآئرو‌دینامیک که در ادامه می‌آید، فراهم کرد.

پیشران‌ش الکتروآئرو‌دینامیک - موتور بی صدا

پیشران‌ش الکتروآئرو‌دینامیک (EAD) - اغلب به عنوان رانش الکترو‌هیدرو‌دینامیک (EHD) یا «باد یونی» نامیده می‌شود - یکی از آن فناوری‌های نادر است که شبیه داستان‌های علمی-تخیلی به نظر می‌رسد: دستگاهی که بی صدا از طریق هوا حرکت می‌کند بدون قطعات متحرک، بدون احتراق، و بدون خروجی قابل مشاهده. عموم مردم اولین بار در اوایل دهه ۲۰۰۰ از طریق پروژه‌های «لیفتر» حیاط پشتی از آن مطلع شدند، و دوباره در سال ۲۰۱۸ زمانی که MIT یک «هواپیمای یونی» را در حال سر خوردن در سالن ورزشی نشان داد.

با این حال، فیزیک زیربنایی تاریخ طولانی‌تر و پیچیده‌تری دارد. تقریباً یک قرن پیش، توماس تاونسند براون و پل بیفلد مشاهده کردند که خازن‌های ولتاژ بالا می‌توانند رانش کوچک اما مداوم تولید کنند. براون این اثر را به «ضدگرانش» نسبت داد. علم مدرن، مجهز به قوانین ماکسول و کولن، به رسمیت می‌شناسد که حقیقت ظریف‌تر است - و به بسیاری از جهات، عمیق‌تر.

پیشران‌ش EAD درباره دمیدن هوا با یون‌ها نیست. این درباره شکل‌دهی میدان‌های الکتریکی است تا تنش‌های الکترواستاتیک ناشی رانش مکانیکی خالص تولید کنند. در این معنا، دستگاه‌های EAD توسط ماکسول و کولن قدرت می‌گیرند: توسط هندسه و دینامیک خود میدان الکتریکی.

تصور غلط باد یونی

از اکثر مهندسان در مورد پیشران‌ش EHD بپرسید و داستان ساده‌ای خواهید شنید: یک ساطع‌کننده تیز یون‌ها را از طریق تخلیه کرونا تولید می‌کند؛ این یون‌ها به سمت الکتروود جمع‌کننده شتاب می‌گیرند، در حالی که با مولکول‌های خنثی هوا برخورد می‌کنند و تکانه را به آنها منتقل می‌کنند. گاز خنثی حرکت می‌کند - باد یونی معروف - و بر اساس قانون سوم نیوتن، دستگاه رانش برابر و مخالف را تجربه می‌کند.

این تصویر اشتباه نیست، اما ناقص است.

در عمل، یون‌ها جرم ناچیزی حمل می‌کنند. برخوردهای آنها با خنثی‌ها مکرر است، بلکه، اما تکانه منتقل شده در هر برخورد کوچک است. مهم‌تر از آن، هیچ نیروی مکانیکی قابل توجهی مستقیماً بر نوک سوزن یا جمع‌کننده عمل نمی‌کند. «باد» یک محصول جانبی است، نه منبع، پیشرانش.

موتور واقعی در میدان الکتریکی نهفته است که این یون‌ها را شتاب می‌دهد - در بازتوزیع انرژی الکترواستاتیک به عنوان بار فضایی تشکیل و جریان می‌یابد.

فشار میدان و تنش ماکسول

معادلات ماکسول توصیف می‌کنند که چگونه میدان‌های الکتریکی تکانه را از طریق **تنسور تنش ماکسول** ذخیره و منتقل می‌کنند:

$$\mathbf{T} = \epsilon_0(\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

انتگرال‌گیری این تنسور بر سطح هر جسم، فشار الکترواستاتیک خالص **عمل کردن** بر آن را به دست می‌دهد. این فشار - نه حرکت هوا - است که یک رانشگر EHD را به جلو می‌راند.

هنگامی که تخلیه کرونا رخ می‌دهد، ابری از یون‌ها اطراف ساطع‌کننده تشکیل می‌شود. این یون‌ها دو چیز حیاتی انجام می‌دهند:

۱. آنها میدان الکتریکی ساطع‌کننده را تا حدی محافظت می‌کنند. شدت میدان محلی نزدیک نوک کاهش می‌یابد، اما در حجم اطراف قوی باقی می‌ماند.

۲. آنها هندسه کلی میدان را تحریف می‌کنند. در یک سمت ساطع‌کننده، خطوط میدان بر سطوح باردار نزدیک یا ساختارهای زمین‌شده خاتمه می‌یابند. در سمت دیگر، آنها به بیرون گسترش می‌یابند، تا حدی توسط بار فضایی خنثی‌شده.

نتیجه یک **عدم تعادل در فشار الکترواستاتیک** بر سیستم ساطع‌کننده-جمع‌کننده است - یک نیروی خالص. تکانه از میدان به الکترودها جریان می‌یابد، نه از طریق برخوردهای مولکولی.

قانون کولن در عمل

در ساده‌ترین سطح، نیروهای درگیر توسط قانون کولن توصیف می‌شوند:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

هر عنصر سطح باردار یک ساختار EHD هر منطقه باردار دیگر در محیط خود را جذب یا دفع می‌کند. رانش کل مجموع برداری این تعاملات کولنی بی‌شمار است، که مداوم توسط یون‌های متحرک که میدان را مدوله می‌کنند، باز شکل داده می‌شود.

در حالت پایدار کرونا، لایه نازکی از یون‌های مثبت بین ساطع‌کننده ولتاژ بالا و جمع‌کننده نسبتاً منفی (یا محیط اطراف) قرار می‌گیرد. این یون‌ها به عنوان **واسطه‌ها** عمل می‌کنند: آنها جذب بین ساطع‌کننده و جمع‌کننده را تا حدی محافظت

می‌کنند، و با حرکت، عدم تقارن میدان را مداوم بازنشانی می‌کنند. ورودی الکتریکی پایدار آن عدم تعادل را حفظ می‌کند، و انرژی پتانسیل الکترواستاتیک را به نیروی مکانیکی تبدیل می‌کند.

درس‌هایی از ناسا و محدودیت‌های پارادایم باد یونی

در اوایل دهه ۲۰۰۰، ناسا و پیمانکارانش دستگاه‌های نوع بیفلد-براون را تحت مطالعات Talley AIAA و Gravitec بازبینی کردند. با استفاده از خازن‌های نامتقارن ولتاژ بالا در محیط‌های جوی و خلأ، آزمایش‌ها برای آزمایش اینکه آیا اثر می‌تواند بدون حضور هوا ادامه یابد، طراحی شده بودند.

نتایج قاطع - و ناخواسته آشکارکننده - بودند.

در حالت جوی، روتورها به سختی چرخش قابل اندازه‌گیری (۱-۲ دور در دقیقه) و رانش در محدوده ۱۰-۱۰۰ μN به دست آوردند - مرتبه‌های بزرگی کمتر از آنچه انتظار می‌رفت اگر دستگاه‌ها واقعاً از اثر گرانشی استفاده می‌کردند. حرکت کاملاً به تخلیه کرونا معمولی و باد یونی ضعیف نسبت داده شد.

در خلأ، در فشارهای تا 10^{-6} Torr، حرکت کاملاً متوقف شد. هر سیگنال گذرای به خارج‌گازی یا بار سطحی باقی‌مانده نسبت داده شد. بدون مولکول‌های هوا برای حفظ یونیزاسیون، میدان الکترواستاتیک متقارن شد، و نیرو ناپدید شد.

محققان نتیجه گرفتند که رانش تقریباً خطی با چگالی هوا مقیاس‌بندی می‌شود - یافته‌ای که اغلب برای «رد» پیش‌رانش EHD به عنوان غیرممکن در خلأ 应用 می‌شود. اما آنچه واقعاً نشان داد، چیزی عمیق‌تر بود: بدون محیطی برای حمل بار فضایی، میدان الکتریکی عدم تقارن تولیدکننده گرادیان‌های فشار الکترواستاتیک را از دست می‌دهد.

به عبارت دیگر، آن آزمایش‌های اولیه ناخواسته تفسیر تنش ماکسول پیش‌رانش الکتروآرودینامیک را تأیید کردند. این گرانش نبود، نه فقط کشش یونی - حضور عدم تعادل میدان واسطه‌شده توسط بار بود که اهمیت داشت.

دستگاه‌های Gravitec، ساخته‌شده برای سادگی و تقارن، فاقد هر مخزن بار قابل توجه یا دی‌الکتریک شکل‌دهنده میدان بودند. هندسه‌های باز آنها خطوط میدان را به محیط اطراف پخش می‌کردند، و بیشتر انرژی الکترواستاتیک را هدر می‌دادند.

در مقابل، روتور EPS-آلومینیومی توصیف‌شده در اینجا بار را در امتداد پوست رسانای به‌خوبی تعریف‌شده متمرکز کرد، و اجازه داد ناحیه بار فضایی میدان محلی را شکل دهد. نتیجه: رانش قابل استفاده با کمتر از ۶ کیلوولت و حدود ۱۰۰ میلی‌وات - عملکرد تقریباً دو مرتبه بزرگتر در کارایی انرژی.

این یافته‌ها اکوی تم مداوم را می‌زنند: کارایی الکتروآرودینامیک از ولتاژ یا جریان هوا ناشی نمی‌شود، بلکه از کنترل توپولوژی بار و هندسه میدان.

اثر مخزن بار

فویل سبک بر روی هسته سفت و عایق نه تنها به عنوان رسانا عمل می‌کند - بلکه مخزن بار با مساحت بزرگ تشکیل می‌دهد که عدم تقارن میدان الکتریکی را تقویت می‌کند. در طراحی فعلی، پلی استایرن منبسط‌شده (EPS) صرفاً به عنوان پشتیبانی ساختاری سبک عمل می‌کند، سطح کامل آن با فویل آلومینیومی پوشیده‌شده که به‌طور الکتریکی مداوم با منبع

ولتاژ بالا است. EPS عملکرد الکتریکی ناچیزی اضافه می‌کند؛ ارزش آن در امکان‌دهی سطح رسانای بزرگ با جرم حداقل است.

این پوست رسانای گسترده بار را مستقیماً از منبع تغذیه ذخیره می‌کند، و اجازه می‌دهد تخلیه کرونا علیه میدان الکترواستاتیک از پیش بارگذاری شده عمل کند به جای ساخت آن از صفر در هر چرخه. مساحت سطح بالای فویل ظرفیت مؤثر را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد - در مرتبه 10^{-10} تا 10^{-2} pF cm⁻²، بسته به بافت سطح و انحنا - و ولتاژ اعمال شده сром را به گرادیان میدان الکتریکی محلی بسیار قوی‌تر تبدیل می‌کند.

هنگامی که کرونا شعله‌ور می‌شود، فویل به عنوان مرجع پتانسیل پایدارکننده عمل می‌کند. یون‌های ساطع‌شده میدان محلی را کمی مدوله می‌کنند اما آن را غالب نمی‌کنند؛ در عوض، بار سطحی ذخیره‌شده عدم تقارن پایدار را حفظ می‌کند که رانش مداوم را با توان بسیار پایین تولید می‌کند.

از دیدگاه تنش ماکسول، نیرو متناسب با انتگرال شدت میدان و گرادیان آن است:

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

و فویل بزرگ و به‌خوبی باردار هر دو جمله را بدون نیاز به ولتاژ بالاتر یا جریان بالاتر به حداکثر می‌رساند. این توضیح می‌دهد که چرا روتور کم‌توان و کم‌ولتاژ می‌توانست چرخش قابل توجهی به دست آورد: آن انرژی الکترواستاتیک ذخیره‌شده را جایگزین تلفات جریان یون سنگین هندسه‌های «باد یونی» معمولی کرد - شکلی عملی از کارایی الکترواستاتیک.

هندسه کارایی

کارایی یک رانشگر EHD نه توسط سرعت جریان هوا، بلکه توسط چقدر مؤثر میدان الکتریکی شکل داده می‌شود تعیین می‌شود. پارامترهای کلیدی عبارتند از:

- عدم تقارن میدان: مؤلفه جهت‌دار خالص گرادیان فشار الکترواستاتیک.
- توزیع چگالی بار: چگونگی تغییر میدان توسط ابر یون از طریق محافظت جزئی.
- کوپلینگ خازنی: بار کل ذخیره‌شده بر سطوح روبه‌رو در هر ولت اعمال شده.
- کانال‌های تلفات: تلفات کرونا، recombination، و نشت دی‌الکتریک.

طراحی‌هایی که میدان را محدود و شکل می‌دهند - برای مثال، با قرار دادن سطح وسیع با بار مخالف نزدیک ساطع‌کننده - می‌توانند بهبودهای مرتبه‌های بزرگی در رانش در هر وات به دست آورند. میدان الکتریکی کار را انجام می‌دهد؛ یون‌ها فقط اجازه می‌دهند میدان نامتقارن و پویا بماند.

بازبینی بیفلد-براون

مشاهدات اولیه براون از رانش خازن‌های نامتقارن قبل از درک مدرن ما از فیزیک پلاسما است. بدون چارچوب تنش ماکسول یا دینامیک بار فضایی، طبیعی بود که فکر کنیم اثر ممکن است شامل گرانش باشد. واقعیت اینکه رانشگرهای EHD نیرو را «علیه» بردار میدان تولید می‌کنند (و گاهی عمودی به بالا) فقط رمز و راز را عمیق‌تر کرد.

دیده شده از لنز امروز، «ضدگرانش» براون فقط فشار الکترواستاتیک آشکار شده بود. شباهت در فرم ریاضی - هر دو انرژی پتانسیل گرانشی و الکترواستاتیک به عنوان $1/r^2$ کاهش می یابد - سردرگمی را تاریخی قابل درک کرد، اما فیزیک کاملاً الکترومغناطیسی است.

دیدگاه ها و زمینه مدرن

تحلیل های اخیر و بحث های همتایان این بازسازی پیش رانش الکتروآرودینامیک را به عنوان یک پدیده گرادیان میدان به جای موتور باد یونی تقویت می کنند. در پیکربندی های لیفتر کلاسیک، جریان های کرونا در مرتبه میلی آمپر در ده ها کیلوولت چگالی های رانش در محدوده میکرو- تا میلی نیوتن در هر وات به دست می دهند - انعکاسی از اینکه چقدر کمی از انرژی میدان الکتریکی به تنش مکانیکی جهت دار ختم می شود. در مقابل، روتور EPS پوشیده شده با فویل همان قانون فیزیکی را به فرآیند رانده شده توسط بار تبدیل می کند: سطح رسانای وسیع گرادیان E قوی را با جریان حداقل حفظ می کند، و تلفات درفت را با انرژی میدان ذخیره شده مبادله می کند.

این تمایز اکوی جابجایی گسترده تر در تحقیقات معاصر است. عملگرهای تخلیه سد دی الکتریک در کنترل آیرودینامیک نیز نیروی سطحی خود را از تنش ماکسول به جای جریان هوای حجمی مشتق می کنند، و کارایی ۱۰-۱۰۰ $N kW^{-1}$ را زمانی که هندسه الکتروود برای عدم تقارن تنظیم شده، به دست می آورند. هندسه های الکتروود شناور و محصور در حال مطالعه در ONERA و در برنامه های EHD اتحادیه اروپا افزایش دو تا پنج برابری رانش را با شکل دهی غلاف یون نشان می دهند - دقیقاً منطق طراحی روتور مخزن بار. و در محیط های هوای نازک، مانند استراتوسفر فوقانی یا اتمسفر مریخ، جایی که کشش یونی ضعیف می شود اما تنش الکترواستاتیک باقی می ماند، سطوح غنی از بار می توانند پیش رانش را طولانی پس از شکست طراحی های معمولی حفظ کنند.

فیزیک به طور مرتب با چارچوب تکانه پوینتینگ الکترومغناطیس کلاسیک همخوانی دارد: رانش متناسب با گرادیان چگالی انرژی میدان است،

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

به این معنا که سیستم تکانه را مستقیماً از میدان الکترومغناطیسی می کشد. یونها کاتالیزورهایی هستند که عدم تعادل را حفظ می کنند، نه جرم واکنش خود. این توضیح می دهد که چرا در آزمایش های خلأ جایی که میدان متقارن می شود، رانش ناپدید می شود - جمله ∇E فرومی ریزد. برعکس، در روتور مخزن فویل، پوست خازنی E را شیب دار و جهت دار نگه می دارد، و حدود 0.1-1 mN رانش معادل گشتاور از تنها 100 mW توان ورودی تولید می کند - ۱۰-۱۰۰ برابر کارایی دستگاه های کشش یونی.

پارامتر	طراحی باد یونی معمولی	روتور مخزن بار فویل	پیامد
ولتاژ	۲۰-۵۰ kV	> ۶ kV	خطر شکست کمتر، مقیاس پذیری آسان تر
توان	۱-۱۰ W	≈ ۰.۱ W	۱۰-۱۰۰ × رانش بالاتر / W
مکانیسم رانش	برخوردهای یون-خنثی	گرادیان میدان (تنش ماکسول)	عمدتاً مستقل از چگالی هوا

پارامتر	طراحی باد یونی معمولی	روتور مخزن بار فویل	پیامد
عامل کلیدی	شکاف ساطع‌کننده-جمع‌کننده	مخزن فویل خازنی	بار ذخیره‌شده < جریان گذرا
کارایی (N kW^{-1})	۰.۱-۰.۰۱	۱-۱۰ (استنباطی)	قابل اجرا برای میکرو-UAVها

چنین مقایسه‌هایی یک چرخش مفهومی را برجسته می‌کنند: از پیش‌رانش رانده‌شده توسط جریان به پیش‌رانش رانده‌شده توسط بار، از حرکت ماده به شکل‌دهی میدان‌ها. مرز بعدی آنچه ممکن است معماری الکترواستاتیک نامیده شود - استفاده از بهینه‌سازی محاسباتی و مواد پیشرفته (ساطع‌کننده‌های نانولوله کربنی، فویل‌های الگودار، دی‌الکتریک‌های متاماده) برای به حداکثر رساندن $\int \mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}$. حالت‌های DC پالسی هیبریدی می‌توانند ذخیره بار گذرا را بیشتر بهره‌برداری کنند در حالی که محصولات جانبی شیمیایی را کاهش می‌دهند.

نتیجه‌گیری - با قدرت ماکسول و کولن

پیش‌رانش الکتروآرودینامیک یک کنجکاوی عجیب یا ناهنجاری شبه‌علمی نیست. این تجلی مستقیم قوانین ماکسول و کولن است - یک ماشین ماکروسکوپی که انرژی پتانسیل الکترواستاتیک را از طریق عدم تقارن میدان کنترل‌شده به حرکت تبدیل می‌کند.

جایی که مخترعان اولیه «ضدگرانش» می‌دیدند و پروژه‌های مدرن «باد یونی» می‌بینند، داستان واقعی ساده‌تر و عمیق‌تر است: میدان‌های الکتریکی دارای تنش هستند. آن تنش را شکل دهید، و می‌توانید خود را از طریق هوا بدون قطعات متحرک، بدون سوخت، و بدون صدا بکشید.

این نبوغ آرام پیش‌رانش الکتروآرودینامیک است - واقعاً، با قدرت ماکسول و کولن.

منابع

۱. Talley, C. et al. ارزیابی اثر بیفلد-براون: آزمایش‌های رانشگر خازن نامتقارن در خلأ و جو. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
۲. Brown, T. T. U.S. Patent. دستگاه الکتروکینتیک. 1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
۳. Wilson, S., Barrett, S. R. No. 3,187,206, 1965. پرواز هواپیمایی با پیش‌رانش یونی حالت جامد. *Nature*.
۴. Moreau, E. J. *Phys. D*: کنترل جریان هوا توسط عملگرهای پلاسمای غیرحرارتی. 563, 532-535 (2018).
۵. Ronney, P. D. *Appl. Phys.* 40, 605-636 (2007). کنترل جریان EHD و عملگرهای پلازما. NASA.
۶. Technical Reports Server, 2015. برنامه EHD ONERA: پیش‌رانش الکتروهیدروآرودینامیک و کنترل جریان. گزارش‌های داخلی ۲۰۱۸-۲۰۲۳.