

صعود، پرواز، مدار

کشتی هوایی الکتروآئروآینامیک با انرژی خورشیدی برای دسترسی پایدار به فضا

چشم انداز و پایه های فیزیکی

رویای پرواز همیشه مسابقه ای بین صبر و قدرت بوده است. بالن سواران اولیه قرن هجدهم به آرامی به آسمان صعود می کردند با استفاده از گازهای شناور، در حالی که مهندسان موشک قرن بیستم آن را با آتش می شکافتند. هر دو رویکرد هدف مشترکی دارند — فرار از استبداد جاذبه — اما در فلسفه کاملاً متفاوت هستند. یکی هوا را به عنوان شریک استفاده می کند؛ دیگری آن را مانع می بیند. بین این دو افراط، راه سومی وجود دارد که هنوز در عمل محقق نشده اما در اصل دیگر غیرممکن نیست: یک کشتی هوایی خورشیدی که می تواند به مدار پرواز کند، ابتدا با شناوری صعود می کند، سپس با نیروی بالابر آیرودینامیک، و در نهایت با پشتیبانی گریز از مرکز، همه بدون سوخت شیمیایی.

در قلب این مفهوم پیش رانش الکتروآئروآینامیک (EAD) قرار دارد — نوعی از رانش الکتریکی که از میدان های الکتریکی برای شتاب دادن به یون ها در هوا استفاده می کند. یون های شتاب دار، تکانه را به مولکول های خنثی منتقل می کنند و جریان حجمی و رانش خالص روی الکترودها تولید می کنند. در مقابل موشک که باید جرم واکنش حمل کند یا پروانه که به تیغه های متحرک نیاز دارد، پیش رانش الکتروآئروآینامیک بدون قطعات متحرک و بدون آگزوز داخلی عمل می کند، فقط با نور خورشید و هوا. وقتی به آرایه خورشیدی با راندمان بالا متصل شود و روی بدنه بالابر بزرگ و فوق سبک نصب شود، ماده گمشده را برای شتاب پایدار در جو فوقانی فراهم می کند، جایی که درگ کم است اما هوا هنوز وجود دارد.

پیشنهاد ساده توصیف می شود اما اجرای آن چالش برانگیز است:

1. **صعود** — یک کشتی هوایی شناور پر از هیدروژن یا هلیوم به طور غیرفعال به استراتوسفر صعود می کند، دور از آب و هوا و ترافیک هوایی.
2. **پرواز** — کشتی هوایی به طور افقی با رانش EAD شتاب می گیرد، سرعت را به آرامی افزایش می دهد در حالی که به هوای رقیق تر بالا می رود تا درگ را کاهش دهد.
3. **مدار** — پس از هفته ها شتاب مداوم، نیروی گریز از مرکز جاذبه را متعادل می کند؛ وسیله دیگر به بالابر نیاز ندارد و با پایداری به جای انفجار به ماهواره تبدیل می شود.

این ایده خیال نیست. هر گام در فیزیک شناخته شده ریشه دارد: شناوری، انرژی خورشیدی، الکترواستاتیک و مکانیک مداری. آنچه تغییر می کند، مقیاس زمانی است. به جای دقایق احتراق، هفته ها نور خورشید را در نظر می گیریم. به جای تن های سوخت، به میدان ها و صبر تکیه می کنیم.

انرژی مدار

هر بحثی در مورد پرواز فضایی با انرژی شروع و تمام می‌شود. انرژی جنبشی به ازای هر کیلوگرم جرم مورد نیاز برای حفظ مدار دایره‌ای دور زمین داده شده توسط

$$E_k = \frac{1}{2} v^2$$

که در آن v سرعت مداری است. برای مدار پایین زمین، $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ ، بنابراین $E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$ ، یا تقریباً 30 مگاژول بر کیلوگرم. این معادل انرژی سوزاندن حدود یک کیلوگرم بنزین برای هر کیلوگرم قرارگرفته در مدار است. عدد بزرگی است، اما نه نجومی بزرگ.

حالا آن را با شار خورشیدی مداوم در بالای جو زمین مقایسه کنید: حدود 1,360 وات بر متر مربع. اگر بتوانیم حتی کسری کوچک از آن را به انرژی جنبشی در طول روزها یا هفته‌ها تبدیل کنیم، می‌توانیم در اصل انرژی مداری مورد نیاز را تأمین کنیم. آرایه‌های فوتوولتائیک مدرن با عملکرد بالا قدرت‌های خاص در حد صدها وات بر کیلوگرم دارند. در $P_{sp} = 300 \text{ W/kg}$ ، یک کیلوگرم آرایه 300 ژول بر ثانیه تولید می‌کند. در طول یک روز (8.64×10^4 ثانیه)، آن 2.6×10^7 ژول است — قابل مقایسه با انرژی مداری یک کیلوگرم جرم.

این مقایسه ساده منطق این رویکرد را نشان می‌دهد. انرژی برای مدار از خورشید در حدود یک روز بر کیلوگرم آرایه در دسترس است، اگر بتواند به طور کارآمد به رانش تبدیل شود. چالش عملی این است که درگ و ناکارآمدی‌ها بیشتر آن را جذب می‌کنند. راه‌حل ارتفاع و صبر است: کار در هوای رقیق جایی که درگ پایین است، و کش دادن فرآیند به هفته‌ها به جای ساعت‌ها.

مبادله زمان با سوخت

موشک‌ها مشکل درگ را با نیروی خام حل می‌کنند — آنقدر سریع می‌روند که هوا بی‌ربط می‌شود. کشتی‌های هوایی، برعکس، با هوا کار می‌کنند؛ می‌توانند بمانند. اگر زمان به عنوان منبع قابل مصرف درمان شود، می‌تواند جرم سوخت را جایگزین کند. وظیفه کشتی هوایی حفظ شتاب کوچک اما پایدار در دوره‌های طولانی است، شاید در حد 10^{-3} m/s^2 ، تا سرعت مداری حاصل شود.

اگر صعود به مدار سه هفته طول بکشد، یا حدود 1.8×10^6 ثانیه، شتاب متوسط مورد نیاز

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{t} = \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 4.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

— کمتر از نیمی از هزارم جاذبه زمین. چنین شتاب‌هایی به راحتی برای کشتی هوایی قابل تحمل هستند؛ هیچ تنش ساختاری تحمیل نمی‌کنند. تنها دشواری حفظ آن است، با توجه به مقدار کوچک رانش در دسترس به ازای هر واحد قدرت.

اگر وسیله جرمی 10^3 kg داشته باشد، شتاب متوسط $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ فقط حدود 4 نیوتن رانش خالص نیاز دارد — کمتر از وزن یک سیب. absurdity ظاهری رسیدن به مدار با رانش یک سیب ناپدید می‌شود وقتی زمان به هفته‌ها کشیده شود.

شناوری و مسیر به هوای رقیق

کشتی هوایی سفر خود را مانند هر وسیله سبک‌تر از هوا شروع می‌کند: با جابجایی هوا با گاز سبک‌تر. نیروی شناوری داده شده توسط

$$F_b = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}})gV$$

که در آن V حجم گاز و ρ چگالی‌های مربوطه است. نزدیک سطح دریا، $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$ ، $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$ و $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$. هیدروژن کمی بالاتر بیشتری فراهم می‌کند، حدود 1.1 کیلوگرم بر متر مکعب، در مقایسه با 1.0 کیلوگرم بر متر مکعب برای هلیوم. تفاوت کوچک به نظر می‌رسد اما بر هزاران متر مکعب انباشته می‌شود.

بنابراین هیدروژن مزیت عملکرد قابل اندازه‌گیری ارائه می‌دهد، هرچند به قیمت اشتعال‌پذیری. نیاز به زون‌بندی الکتریکی سختگیرانه و پروتکل‌های تهویه دارد، به ویژه که وسیله سیستم‌های الکترواستاتیک ولتاژ بالا نیز حمل می‌کند. هلیوم بالاتر کمتری ارائه می‌دهد اما کاملاً بی‌اثر است. هر دو گاز قابل اجرا هستند؛ انتخاب به تحمل ریسک مأموریت بستگی دارد. در تست‌های عمومی یا مناطق پرجمعیت اولیه، هلیوم ترجیحی است. برای تلاش‌های دورافتاده یا مداری، هیدروژن ممکن است توجیه شود.

با صعود وسیله، چگالی هوا تقریباً به طور نمایی با ارتفاع مقیاس $H \approx 7.5 \text{ km}$ کاهش می‌یابد. در 30 کیلومتر، چگالی حدود $1/65$ سطح دریا است؛ در 50 کیلومتر، $1/300$. شناوری به طور متناظر ضعیف می‌شود، اما درگ هم. وسیله برای رسیدن به **شناوری خنثی** در ارتفاعی طراحی شده که شدت خورشیدی بالا بماند اما فشار دینامیک حداقل باشد — تقریباً 30–40 کیلومتر در استراتوسفر. از آنجا، شتاب افقی آغاز می‌شود.

بالابر، درگ، و فشار دینامیک

برای حفظ ارتفاع در حین شتاب، کشتی هوایی ممکن است تا حدی به **بالابر آیرودینامیک** تکیه کند. برای بدنه بالابر، نیروهای بالابر و درگ

$$F_L = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_L, \quad F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_D$$

که در آن A ناحیه مرجع، C_L و C_D ضرایب بالابر و درگ هستند. چون ρ در ارتفاع کوچک است، این نیروها کوچک هستند؛ وسیله با ناحیه بزرگ و وزن کم جبران می‌کند.

نسبت $L/D = C_L/C_D$ کارایی پرواز آیرودینامیک را تعیین می‌کند. گلایدرهای مدرن می‌توانند $L/D = 50$ در هوای غلیظ فراتر روند. یک کشتی هوایی فوق‌سبک طراحی شده با صافی شدید و اضافات حداقل می‌تواند به طور منطقی L/D مؤثر 10–20 را حتی در هوای رقیق حفظ کند. اما با رقیق‌تر شدن هوا، انتقال به پرواز مداری توسط بالابر محدود نمی‌شود — توسط قدرت درگ اداره می‌شود.

قدرت مورد نیاز برای غلبه بر درگ

$$P_D = F_D v = \frac{1}{2}\rho v^3 A C_D$$

و با مکعب سرعت مقیاس می‌گیرد. به همین دلیل موشک‌ها سریع شتاب می‌گیرند: اگر بمانند، درگ انرژی‌شان را به طور نمایی مصرف می‌کند. کشتی هوایی مسیر مخالف را می‌گیرد: شتاب جایی که ρ آنقدر کوچک است که P_D حتی در

کیلومترها بر ثانیه محدود بماند.

اگر، مثلاً، $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ (معمول نزدیک 60 کیلومتر ارتفاع)، $C_D = 0.05$ ، $A = 100 \text{ m}^2$ ، و $v = 1.000 \text{ m/s}$ ، آنگاه

$$P_D = 0.5 \times 10^{-5} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^4 \text{ W}$$

یا 25 کیلووات — به راحتی در دسترس خورشیدی. در مقابل، در سطح دریا همان پیکربندی 25 گیگاوات نیاز دارد.

قانون ساده است: هوای رقیق زمان می‌خرد، و زمان سوخت را جایگزین می‌کند.

فرصت الکتروآئرودینامیک

در اوایل قرن بیستم، فیزیک‌دانان مشاهده کردند که میدان‌های الکتریکی قوی نزدیک الکترودهای تیز در هوا یک تاج آبی کم‌رنگ و جریان هوای ظریف تولید می‌کنند. این “باد الکتریکی” از انتقال تکانه بین یون‌ها و خنثی‌ها ناشی می‌شود. عمده‌تاً به عنوان کنجکاوای درمان شد تا الکترونیک ولتاژ بالا بالغ شود. وقتی به درستی ترتیب داده شود، اثر می‌تواند رانش قابل اندازه‌گیری تولید کند.

پیش‌رانش الکتروآئرودینامیک با اعمال ولتاژ بالا بین انتشاردهنده، سیم نازک یا لبه که یون‌ها تولید می‌کند، و جمع‌آورنده، الکتروده وسیع‌تر که آنها را دریافت می‌کند، کار می‌کند. یون‌ها در میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند، با مولکول‌های هوای خنثی برخورد می‌کنند، و تکانه جلو به گاز می‌دهند. دستگاه رانش برابر و مخالف را احساس می‌کند.

در حالی که نمایش‌های اولیه متواضع بودند، آزمایش‌های اخیر — از جمله یک هواپیمای یونی بال ثابت پرواز شده توسط MIT در 2018 — ثابت کردند که پرواز پایدار و بی‌صدا ممکن است. با این حال، ایده این دستاورد را پیشی می‌گیرد. سال‌ها پیش، تحقیقات در فرمول‌بندی‌های مبتنی بر تنسور ماکسول رانش الکتروآئرودینامیک نشان داد که چگونه همان فیزیک می‌تواند به هندسه‌های بزرگ‌تر و هوای رقیق‌تر مقیاس شود. در آن فرمول‌بندی، رانش از “باد” نه، بلکه از تنش الکترومغناطیسی یکپارچه شده بر حجم ناحیه تخلیه ناشی می‌شود.

معادله مربوطه از تنسور تنش ماکسول $\mathbf{T}$ مشتق شده، که برای میدان الکترواستاتیک

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

که در آن ϵ گذردهی محیط، $\mathbf{E}$ بردار میدان الکتریکی، و $\mathbf{I}$ تنسور هویت است. نیروی الکترومغناطیسی خالص روی جسم با انتگرال این تنسور بر سطح آن به دست می‌آید:

$$\mathbf{F}_{EM} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS$$

در ناحیه یونیده، این به چگالی نیروی حجمی ساده می‌شود

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon$$

که در آن ρ_e چگالی بار محلی است. در گاز با گذردهی تقریباً یکنواخت، جمله دوم ناپدید می‌شود و نیروی بدنی کولن زیبا باقی می‌ماند

$$\mathbf{f} \approx \rho_e \mathbf{E}$$

این عبارت فشرده جوهر پیش‌رانش الکتروآرودینامیک است: هر جا که میدان الکتریکی و بار فضایی همزیستی کنند، نیروی بدنی خالص روی محیط عمل می‌کند.

یون‌ها خود کم هستند، اما تکانه‌شان از طریق برخورد به خنثی‌ها منتقل می‌شود. مسیر آزاد متوسط λ بین برخوردها تعیین می‌کند که تکانه چگونه پخش می‌شود؛ معکوس با فشار مقیاس می‌گیرد. در فشارهای پایین‌تر، یون‌ها دورتر در هر برخورد سفر می‌کنند، و کارایی انتقال تکانه تغییر می‌کند. یک **باند فشار بهینه** وجود دارد که یون‌ها هنوز می‌توانند به اندازه کافی برخورد کنند تا گاز را هل دهند اما نه آنقدر که انرژی را هدر دهند با گرم کردن آن. برای جو زمین، آن باند تقریباً بین چند تور و چند میلی‌تور قرار دارد — دقیقاً محدوده‌ای که بین 40 و 80 کیلومتر ارتفاع مواجه می‌شود.

پوشش کشتی هوایی بنابراین میز ایده‌آل برای کاشی‌های الکتروآرودینامیک عمل‌کننده در محیط طبیعی‌شان می‌شود. خود جو جرم واکنش است.

فیزیک پیش‌رانش الکتروآرودینامیک

در نگاه اول، پیش‌رانش الکتروآرودینامیک نامحتمل به نظر می‌رسد. ایده اینکه مجموعه‌ای ساکت و بی‌حرکت از الکترودها بتواند رانشی به اندازه کافی قوی برای حرکت کشتی هوایی تولید کند، با تجربه روزمره در تضاد است. نبود جرم واکنش قابل مشاهده یا ماشین‌آلات متحرک، شهود را به چالش می‌کشد. با این حال، هر یونی که در میدان الکتریکی شناور می‌شود، تکانه حمل می‌کند، و تکانه حفظ می‌شود. میدان به عنوان اهرم نامرئی عمل می‌کند، و هوا به عنوان سیال کاری آن.

پایه‌های این پدیده نه در فیزیک پلاسمای عجیب بلکه در **معادلات ماکسول** و بیان مکانیکی‌شان، **تنسور تنش ماکسول**، ریشه دارد. این فرمول‌بندی تنسوری روشن می‌کند که میدان‌های الکتریکی نه تنها الگوهای پتانسیل هستند — تنش مکانیکی را در محیط اطراف ذخیره و منتقل می‌کنند.

تنش میدان و نیروی بدنی کولن

تنسور تنش ماکسول در الکترواستاتیک

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

که در آن ϵ گذردهی، $\mathbf{E}$ میدان الکتریکی، و $\mathbf{I}$ تنسور هویت است. جمله اول فشار جهت‌دار در امتداد خطوط میدان را نشان می‌دهد، و جمله دوم تنش ایزوتروپیک که از واگرایی میدان مقاومت می‌کند.

نیروی الکترومغناطیسی خالص روی جسم غوطه‌ور در چنین میدانی، انتگرال سطحی این تنسور است:

$$\mathbf{F}_{EM} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS$$

از نظر فیزیکی، این عبارت به ما می‌گوید که میدان الکتریکی تنش روی مرزهای هر ناحیه حاوی بار یا گرادیان‌های دی‌الکتریک اعمال می‌کند. اما می‌تواند با قضیه واگرایی به فرم حجمی محلی‌تر بازنویسی شود:

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon$$

جمله اول، $\rho_e \mathbf{E}$ ، نیروی بدنی کولن آشنا است: چگالی بار در معرض میدان. جمله دوم فقط جایی مهم است که گذردهی محیط سریع تغییر کند، مانند در مرزهای مواد. در هوا، ϵ اساساً یکنواخت است، بنابراین $\nabla \epsilon \approx 0$ ، و

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$$

این معادله به طرز فریبنده ساده، اصل کامل پیش‌رانش الکتروآرودینامیک را کدگذاری می‌کند. اگر حجمی از گاز وجود داشته باشد که در آن یون‌ها (با چگالی ρ_e) در معرض میدان الکتریکی $\mathbf{E}$ قرار گیرند، چگالی نیروی خالص روی آن گاز عمل می‌کند. بزرگی رانش کل، انتگرال حجمی $\rho_e \mathbf{E}$ بر ناحیه تخلیه است:

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_e \mathbf{E} dV$$

الکترودها واکنش برابر و مخالف را احساس می‌کنند و رانش تولید می‌کنند.

انتقال تکانه و نقش برخوردها

یون‌ها در هوا به ندرت دور سفر می‌کنند قبل از برخورد با مولکول‌های خنثی. مسیر آزاد متوسط λ نسبت معکوس با فشار گاز p و سطح مقطع σ دارد:

$$\lambda \approx \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

که در آن d قطر مولکولی است. در سطح دریا، λ کوچک است — در حد ده‌ها نانومتر. در مزوسفر (حدود 70 کیلومتر)، λ به میلی‌متر یا سانتی‌متر کشیده می‌شود.

وقتی یک یون تحت میدان شتاب می‌گیرد، تکانه را از طریق برخوردها به خنثی‌ها منتقل می‌کند. هر برخورد بخشی از تکانه جهت‌دار یون را به اشتراک می‌گذارد؛ اثر تجمعی جریان خنثی حجمی است — آنچه آزمایشگران باد یونی می‌نامند. گاز از انتشاردهنده به جمع‌آورنده حرکت می‌کند، و الکترودها رانش واکنش مخالف را تجربه می‌کنند.

در هوای بسیار غلیظ، یون‌ها بیش از حد برخورد می‌کنند؛ سرعت رانش‌شان اشباع می‌شود، و انرژی به عنوان گرما از دست می‌رود. در هوای بسیار رقیق، برخوردها خیلی نادر هستند؛ یون‌ها آزادانه پرواز می‌کنند اما خنثی‌ها را به طور مؤثر نمی‌کشند. بین این افراط، نقطه شیرین وجود دارد که مسیر آزاد متوسط اجازه انتقال تکانه کارآمد می‌دهد — دقیقاً ناحیه‌ای که کشتی هوایی در مسیرش به فضا عبور می‌کند.

در فشارهای حدود 10^{-2} تا 10^{-4} بار (مطابق 40–80 کیلومتر ارتفاع)، یون‌ها می‌توانند بر مسافت‌های ماکروسکوپی شتاب بگیرند قبل از برخورد، اما برخوردها هنوز به اندازه کافی مکرر رخ می‌دهند تا رانش تولید کنند. کوپلینگ الکتروآرودینامیک بین میدان و گاز در بهترین حالت است.

رابطه قدرت-رانش

قدرت الکتریکی تحویل‌شده به تخلیه $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$ است، که تقریباً IV برای جریان ثابت I و ولتاژ V است. خروجی مکانیکی مفید رانش ضربدر سرعت جرم هوای شتاب‌دار است، اما در پیش‌رانش پایدار، عمدتاً به نسبت رانش-قدرت، T/P ، علاقه‌مند هستیم.

مطالعات تجربی مقادیری T/P از چند میلی نیوتن بر وات (mN/W) تا نزدیک $0.1 N/W$ تحت شرایط بهینه گزارش کرده‌اند. در هوای جوی در فشار استاندارد، EAD ناکارآمد است؛ اما در فشارهای کاهش یافته، تحرک یونی افزایش می‌یابد و چگالی جریان می‌تواند در ولتاژهای پایین‌تر حفظ شود، T/P را بهبود می‌بخشد.

یک استدلال ابعادی ساده چگالی نیروی بدنی $f = \rho_e E$ را به چگالی جریان $J = \rho_e \mu E$ مرتبط می‌کند، که در آن μ تحرک یونی است. سپس

$$f = \frac{J}{\mu}$$

پس برای چگالی جریان داده‌شده، تحرک بالاتر (در فشار پایین‌تر حاصل) رانش بیشتری به ازای هر جریان می‌دهد. قدرت الکتریکی کل $P = JEV$ است، پس رانش-به-قدرت به عنوان

$$\frac{T}{P} \approx \frac{1}{E\mu}$$

مقیاس می‌گیرد، که نشان می‌دهد میدان‌های الکتریکی پایین‌تر یا تحرک یونی بالاتر کارایی را افزایش می‌دهند. اما E پایین‌تر جریان را نیز کاهش می‌دهد و بنابراین رانش کل را، پس باز هم رژیم بهینه وجود دارد.

این روابط کنجکاوهای نظری نیستند — طراحی هر کاشی EAD را تعیین می‌کنند. در ارتفاع داده‌شده، ولتاژ، فاصله شکاف، و هندسه انتشاردهنده باید تنظیم شوند تا **منحنی پاسخ** (که ولتاژ شکست را به محصول فشار-فاصله مرتبط می‌کند) ارضا شود اما فراتر نرود.

قانون پاسخ برای هوا تقریباً به صورت

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1 + 1/\gamma_{se})]}$$

بیان می‌شود که در آن A و B ثابت‌های تجربی و γ_{se} ضریب انتشار الکترون ثانویه است. هندسه متغیر کشتی هوایی اجازه تنظیم دینامیک d ، فاصله الکترودها، را برای حفظ تخلیه کرونا کارآمد بدون قوس به عنوان فشار محیطی در طول صعود کاهش می‌یابد، می‌دهد.

هندسه میدان و توپولوژی تنش

نمایش‌های اولیه “لیفتر” از سیم نازک به عنوان انتشاردهنده و فویل مسطح به عنوان جمع‌آورنده استفاده می‌کردند. خطوط میدان به شدت خمیده بودند، و بیشتر انرژی صرف حفظ کرونا می‌شد به جای تولید رانش مفید. کارایی ضعیف بود زیرا **میدان تنش ماکسول** با جهت رانش مورد نظر هم‌تراز نبود.

بینش کلیدی — توسعه‌یافته در کار نظری پیش از هواپیمای یونی MIT — درمان میدان الکتریکی نه به عنوان محصول جانبی بلکه به عنوان متغیر طراحی اصلی بود. رانش از **انتگرال تنش الکترومغناطیسی** در امتداد خطوط میدان ناشی می‌شود، پس هدف شکل دادن به آن خطوط برای موازی و سازگار بودن در ناحیه وسیع است. تشبیه آیرودینامیک است: همانطور که جریان لامینار صاف درگ را به حداقل می‌رساند، توپولوژی میدان الکترواستاتیک صاف تنش جهت‌دار را بهینه می‌کند.

این “مهندسی توپولوژی میدان” دستگاه را به عنوان **عملگر الکترواستاتیک** بازتعریف می‌کند نه اسباب بازی پلاسما. با کنترل انحنای الکترودها، پتانسیل‌های نگهبان، و لایه‌های دی‌الکتریک، می‌توان **E** را تقریباً یکنواخت در مسیر شتاب کرد، تنش شبه‌خطی تولید کرد و از تمرکز خودمختار مخرب که باعث قوس می‌شود، اجتناب کرد.

پیامد قابلیت مقیاس‌پذیری است. وقتی الکترودها به کاشی‌های متر مربعی tessellated شوند، هر کدام با مبدل ولتاژ بالا و منطق کنترل خود، تمام پوشش کشتی هوایی می‌تواند به آرایه EAD توزیع‌شده غول‌پیکر تبدیل شود. هیچ قطعه متحرکی برای همگام‌سازی وجود ندارد، فقط میدان‌ها برای هماهنگی.

چگالی رانش و مسیر به مقیاس‌پذیری

چگالی نیروی بدنی حجمی $f = \rho_e E$ است. چگالی بار در تخلیه کرونا معمولی در فشار جوی در حد 10^{-5} تا 10^{-3} C/m^3 است. در فشار کاهش‌یافته، می‌تواند کمی افت کند، اما میدان الکتریکی **E** می‌تواند به طور ایمن به ده‌ها کیلوولت بر سانتی‌متر بدون شکست افزایش یابد.

اگر $\rho_e = 10^{-4} \text{ C/m}^3$ و $E = 10^5 \text{ V/m}$ ، چگالی نیرو $f = 10 \text{ N/m}^3$ است. گسترده بر ناحیه فعال 1 متری ضخامت، فشار سطحی 10 N/m^2 می‌دهد — معادل چند میلی‌پاسکال. ممکن است کوچک به نظر برسد، اما بر هزاران متر مربع، قابل توجه می‌شود. سطح 1000 متر مربعی با تنش 10 N/m^2 10,000 نیوتن رانش تولید می‌کند، کافی برای شتاب وسیله چند ثنی در سطوح میلی‌جی — دقیقاً رژیم مورد نیاز برای بالا بردن مدار در هفته‌ها.

چنین برآوردهایی نشان می‌دهند چرا EAD، با وجود چگالی قدرت پایین، برای سازه‌های بزرگ و سبک در هوای رقیق امکان‌پذیر می‌شود. برخلاف نازل موشک که فقط وقتی چگالی قدرت بالا است کارایی کسب می‌کند، EAD از ناحیه سود می‌برد. پوشش کشتی هوایی ناحیه فراوان فراهم می‌کند؛ تبدیل آن به سطح فعال تطابق طبیعی است.

ناحیه شیرین جو فوقانی

هر سیستم فیزیکی niche عملیاتی دارد. برای پیش‌رانش EAD، بهترین رژیم جایی است که فشار گاز به اندازه کافی پایین است تا ولتاژهای بالا و مسیرهای آزاد متوسط یونی طولانی را مجاز کند، اما نه آنقدر پایین که پلاسما بدون برخورد شود.

زیر حدود 20 کیلومتر، جو خیلی غلیظ است: تحرک یونی پایین، ولتاژهای شکست بالا، و انرژی هدر رفته در گرم کردن گاز. بالای حدود 100 کیلومتر، هوا خیلی رقیق می‌شود: یون‌سازی نمی‌تواند به طور مداوم حفظ شود، و جرم واکنش خنثی ناپدید می‌شود. بین حدود 40 و 80 کیلومتر **باند انتقالی** — مزوسفر پایین — قرار دارد که پیش‌رانش EAD می‌تواند بهترین نسبت‌های رانش-به-قدرت را تولید کند.

به طور خوشایند، این همچنین محدوده ارتفاع است که قدرت خورشیدی تقریباً بدون تضعیف باقی می‌ماند و درگ آیرودینامیک سفارش‌های بزرگی کوچک‌تر از سطح دریا است. پنجره باریکی اما بخشنده است، راهرویی طبیعی برای نوع جدیدی از وسیله: نه هواپیما و نه موشک، بلکه چیزی که در هم‌پوشانی بین آنها زندگی می‌کند.

کارایی و جریان انرژی

در هر لحظه، قدرت الکتریکی ورودی **P** بین تقسیم می‌شود:

1. قدرت رانش مکانیکی مفید $P_T = T v_{\text{eff}}$ که در آن v_{eff} سرعت اغروز مؤثر جریان هوا است.
2. تلفات یون سازی P_i ، انرژی مورد نیاز برای حفظ پلاسما.
3. تلفات مقاومتی P_r ، به دلیل گرمایش اهمی و نشت.
4. تلفات تابشی P_γ ، ساطع شده به عنوان نور (درخشش کرونا آشنا).

کارایی کلی $\eta = P_T/P$ است. آزمایش‌ها پیشنهاد می‌کنند η می‌تواند چند درصد در هوای غلیظ و بالقوه ده‌ها درصد در عملیات فشار پایین بهینه برسد. هرچند متواضع، این اعداد برای سیستم خورشیدی عمل‌کننده بر دوره‌های طولانی کافی هستند، جایی که کارایی می‌تواند با زمان مبادله شود.

برخلاف پیش‌رانش شیمیایی که باید کارایی بالا به ازای هر ثانیه برای به حداقل رساندن سوخت برسد، کشتی هوایی EAD خورشیدی می‌تواند ناکارآمدی را تحمل کند اگر بتواند به طور نامحدود عمل کند. معیار موفقیت نه impulse خاص بلکه صبر خاص است: ژول‌های انباشته شده بر روزها.

از تنش ماکسول به رانش ماکروسکوپی

برای نشان دادن ارتباط بین نظریه میدان و تجربه روزمره، خازن صفحه موازی در خلا را در نظر بگیرید. فشار بین صفحات $p = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$ است. اگر $E = 10^6 \text{ V/m}$ ، آنگاه $p \approx 4.4 \text{ N/m}^2$ است. ضرب در ناحیه، نیروی مکانیکی مورد نیاز برای جداسازی صفحات را می‌دهد. تنش الکترواستاتیک буквально فشار مکانیکی است.

پیش‌رانش EAD یک صفحه را با خود جو جایگزین می‌کند. یون‌ها محیطی هستند که تنش میدان از طریق آن منتقل می‌شود. به جای فشار استاتیک، جریان جهت‌دار می‌گیریم. معادله $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ آنالوگ دینامیک آن فشار استاتیک خازن است.

وقتی بر سطح کشتی هوایی جمع شود، تنش یکپارچه شده به بردار رانش خالص تبدیل می‌شود، درست مانند فشار یکپارچه شده بر سطح بال، بالابر تولید می‌کند. تشبیه عمیق است: بالابر آیرودینامیک جریان تکانه هوای منحرف شده توسط سطح است؛ رانش EAD جریان تکانه یون‌های شتاب گرفته توسط میدان است.

هواپیمای یونی MIT و اثبات تجربی

برای دهه‌ها، شکاکان EAD را به عنوان کنجاوی آزمایشگاهی رد می‌کردند. سپس، در 2018، یک هواپیمای بال ثابت کوچک ساخته شده توسط MIT پرواز پایدار بدون پروانه را فقط با رانش الکتروآرودینامیک نشان داد. “هواپیمای یونی” حدود 2.5 کیلوگرم وزن داشت و ده‌ها متر تحت قدرت باتری پرواز کرد. نسبت رانش به-وزن کوچک بود، اما دستاورد تاریخی: اولین وسیله سنگین‌تر از هوا حفظ شده در پرواز توسط پیش‌رانش یونی.

مهم، نظریه و کار مفهومی که به آن نمایش منجر شد، قبلاً به طور مستقل در حال توسعه بود. چارچوب نظری ارائه شده در پیش‌رانش الکتروآرودینامیک (ببینید

https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html) همان مکانیسم را در اصطلاحات

تنش ماکسول و نیروی بدنی کولن سال‌ها پیش توصیف کرده بود، با تأکید بر توپولوژی میدان و مقیاس‌پذیری به جای شیمی کرونا.

هواپیمای یونی MIT عملی بودن اثر را در هوای غلیظ ثابت کرد. پروژه Rise-Fly-Orbit هدف گسترش آن به هوای رقیق را دارد، جایی که فیزیک حتی مطلوب‌تر می‌شود. اگر هواپیمای کوچک در 1 بار پرواز کند، کشتی هوایی خورشیدی می‌تواند در میکروبارها به مدار پرواز کند، با صبر و نور خورشید کافی.

فضیلت سادگی

پیش‌رانش EAD مفهومی زیبا است: بدون قطعات متحرک، بدون احتراق، بدون آگزوز سرعت بالا، بدون کریوژنیک. اجزای آن به طور طبیعی مقاوم هستند — الکترودها، دی‌الکتریک‌ها، مبدل‌های قدرت، و پوسته‌های فوتوولتائیک. سیستم به طور طبیعی با ناحیه مقیاس می‌گیرد، نه جرم.

چالش فنی از ترمودینامیک به مهندسی الکتریکی و علم مواد منتقل می‌شود: جلوگیری از فرسایش کرونا، مدیریت نشت بار، و حفظ عایق ولتاژ بالا در فشارهای متغیر. اینها با مواد و میکروالکترونیک مدرن قابل حل هستند.

چون مکانیسم EAD فقط به هندسه میدان و تحرک یونی بستگی دارد، ذاتاً مدولار است. هر متر مربع از پوست کشتی هوایی می‌تواند به عنوان کاشی با T/P و ویژگی‌های ولتاژ شناخته‌شده درمان شود. رانش کل وسیله جمع برداری هزاران کاشی مستقل است. این مدولاریته اجازه تخریب 优雅 را می‌دهد — شکست چند مازول کل وسیله را به خطر نمی‌اندازد.

کشتی هوایی الکتروآئروآینامیک به عنوان سیستم

وقتی به انرژی خورشیدی متصل شود، پیش‌رانش EAD نه تنها منبع رانش بلکه سیستم آب و هوایی برای وسیله می‌شود. همان میدان‌هایی که رانش تولید می‌کنند، گازهای ردیابی را نیز یونیزه می‌کنند، شارژ سطح را کاهش می‌دهند، و بالقوه خواص لایه مرزی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. میدان الکتریکی حتی می‌تواند به عنوان “بادبان الکترواستاتیک” قابل تنظیم خدمت کند، ضعیف با میدان مغناطیسی زمین یا پلاسمای محیط در جو فوقانی تعامل کند.

در بلندمدت، می‌توان تصور کرد کنترل فعال درگ با دستکاری توزیع‌های بار سطحی — سپر درگ الکتروآینامیک که تنش میدان محلی را تغییر می‌دهد تا مسیر پرواز را بدون سطوح کنترل مکانیکی تنظیم کند.

این امکانات پیش‌رانش EAD را فراتر از کنجکاوی به قلمرو فناوری کنترل پرواز حالت جامد عمومی-هدف — قابل اعمال هر جا که گازها یا پلاسماها بتوانند با میدان‌های الکتریکی قطبیزه و شتاب گیرند — می‌برد.

معماری مهندسی و دینامیک پرواز

مزیت اساسی مفهوم Rise-Fly-Orbit نه در مواد عجیب یا فیزیک انقلابی، بلکه در بازآرایی اصول آشنا نهفته است. شناوری، انرژی خورشیدی، و الکترواستاتیک همه خوب فهمیده‌شده هستند. جدید، نحوه توالی آنها در یک پیوستار واحد است: صعود بدون لحظه ناپیوستگی.

موشک‌ها از رژیم‌های متمایز عبور می‌کنند — پرتاب، خستگی، ساحل، مدار. کشتی هوایی الکتروآئروآینامیک، برعکس، فقط انتقال‌های تدریجی تجربه می‌کند. با سبکی صعود می‌کند، با بالابر پرواز می‌کند، و با اینرسی مدار می‌زند. هر مرحله در بعدی ادغام می‌شود، توسط همان تعامل پایدار نیروهای شناوری، آیرودینامیک، و الکترواستاتیک اداره می‌شود.

پوشش: ساختار به عنوان جو

پوشش کشتی هوایی باید تقاضاهای متناقض را ارضا کند: باید سبک و قوی، هادی و عایق، شفاف به نور خورشید اما مقاوم به تابش باشد. اینها از طریق ساخت لایه‌ای قابل آشتی هستند.

لایه بیرونی می‌تواند پلیمر فلزی شده باشد — مثلاً، فیلم نازک کاپتون آلومینیوم شده یا پلی اتیلن ترفتالات. این لایه محافظ UV فراهم می‌کند و به عنوان سطح الکتروود جزئی برای کاشی‌های EAD خدمت می‌کند. زیر آن لایه دی‌الکتریک قرار دارد که تخلیه ناخواسته را جلوگیری می‌کند و شکاف به الکتروود جمع‌آورنده داخلی را تعریف می‌کند. ساختار داخلی شبکه‌ای از غشاهای کشیده و تیرها است که هندسه کلی را در بیش‌فشار داخلی کوچک حفظ می‌کند، در حد $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$ — فقط چند هزارم فشار جوی.

این بیش‌فشار برای نگه داشتن پوشش کشیده کافی است اما نه برای ایجاد جرم ساختاری قابل توجه. در واقع، کل وسیله خازن عظیم و سبک است، پوستش باردار و زنده با خطوط میدان.

حجم داخلی با گاز بالابر — هیدروژن یا هلیوم — پر شده است. چون بیش‌فشار مورد نیاز کوچک است، تقاضاهای باربر روی ماده متواضع هستند. چالش اصلی نفوذپذیری گاز و تخریب UV بر مأموریت‌های طولانی است، هر دو با پوشش‌ها و فیلم‌های لایه‌ای مدرن قابل رسیدگی.

هیدروژن یا هلیوم

انتخاب گاز شخصیت وسیله را شکل می‌دهد.

هیدروژن بیشترین بالابر را ارائه می‌دهد، حدود 10% شناوری بیشتر از هلیوم. این تفاوت وقتی حجم کل به میلیون‌ها متر مکعب برسد، قابل توجه می‌شود. هیدروژن همچنین آسان‌تر منبع‌یابی می‌شود و حتی می‌تواند در محل با الکترولیز خورشیدی آب تولید شود. معایب آن، البته، اشتعال‌پذیری است.

حضور الکترواستاتیک ولتاژ بالا، مدیریت هیدروژن را غیرساده می‌کند. ایمنی به compartmentation دقیق، محافظ الکترواستاتیک، و تهویه بستگی دارد. ماژول‌های EAD خود مهر و موم شده و از سلول‌های گاز توسط سدهای دی‌الکتریک جدا هستند، و تفاوت‌های پتانسیل بر بدنه با توزیع بار متقارن به حداقل می‌رسد.

هلیوم، در مقابل، بی‌اثر و ایمن است اما بالابر کمتری و هزینه بالاتری ارائه می‌دهد. معایب اصلی آن کمبود است؛ استفاده در مقیاس بزرگ می‌تواند عرضه را تحت فشار قرار دهد. برای وسایل تست اولیه و پروازهای نمایش عمومی، هلیوم انتخاب عاقلانه است. برای تلاش‌های مداری عملیاتی در راهروهای دورافتاده، هیدروژن ممکن است با عملکرد و هزینه توجیه شود. به هر حال، طراحی پوشش عمدتاً سازگار است؛ فقط سیستم‌های مدیریت گاز و ایمنی متفاوت هستند.

انرژی خورشیدی و مدیریت انرژی

خورشید موتور وسیله است. هر وات انرژی الکتریکی با نور خورشید جذب‌شده توسط پوست فوتوولتائیک شروع می‌شود.

فوتوولتائیک‌های با کارایی بالا و فوق‌سبک — کامپوزیت‌های فیلم نازک گالیوم-آرسنید یا پروسکایت لمینیت شده بر سطح کشتی هوایی — می‌توانند قدرت‌های خاص نزدیک به $W/kg \text{ } 400\text{--}300$ برسند. آرایه‌ها به طور همگرا ترتیب داده

می‌شوند تا صافی آبرودینامیک حفظ شود. مدیریت قدرت توزیع شده است: هر بخش پنل به یک ردیاب نقطه قدرت حداکثر محلی (MPPT) تغذیه می‌کند که ولتاژ را به باس ولتاژ بالا تنظیم می‌کند که کاشی‌های EAD را تأمین می‌کند.

چون وسیله چرخه‌های روز-شب را تجربه می‌کند، **بافر انرژی متواضع** — باتری‌های سبک یا سوپرکاپاسیتورها — حمل می‌کند تا عملیات سطح پایین را در تاریکی حفظ کند. اما اینها بزرگ نیستند؛ فلسفه طراحی سیستم **رانش خورشیدی مستقیم** است، نه انرژی ذخیره شده. در ارتفاعات مداری، وسیله می‌تواند تقریباً به طور مداوم نور خورشید را تعقیب کند، فقط به طور مختصر در کسوف فرو رود.

کنترل حرارتی تابشی مدیریت می‌شود. با همرفت ناچیز در ارتفاع بالا، رد حرارت به **سطوح با emissivity بالا** و مسیرهای هدایت به رادیاتورهای تکیه دارد. خوشبختانه، فرآیند EAD نسبتاً خنک است — بدون احتراق — و بار حرارتی اصلی از نور خورشید جذب شده است.

کاشی‌های الکتروآئرودینامیک

هر متر مربع از پوشش به عنوان **کاشی EAD** عمل می‌کند — سلول پیش‌رانش خودکفا شامل انتشاردهنده، جمع‌آورنده، و مدار کنترل کوچک. انتشاردهنده ممکن است شبکه نازک نوک‌ها یا سیم‌ها در پتانسیل مثبت بالا باشد، در حالی که جمع‌آورنده شبکه وسیعی است که نزدیک زمین یا در پتانسیل منفی نگه داشته می‌شود. فضای بین ناحیه تخلیه کنترل شده است.

وقتی انرژی دار شود، کاشی میدان الکتریکی **E** برقرار می‌کند، چگالی بار **ρ_e** تولید می‌کند، و رانش محلی **$f = \rho_e E$** جهت‌دار مماس بر سطح تولید می‌کند. با مدولاسیون ولتاژها روی کاشی‌های مختلف، کشتی هوایی می‌تواند بدون قطعات متحرک هدایت، پیچش، و غلت زدن کند.

هندسۀ تطبیقی کلید است. با افت فشار محیطی با ارتفاع، مسیر آزاد متوسط افزایش می‌یابد. برای حفظ تخلیه کارآمد، فاصله شکاف مؤثر **d** بین انتشاردهنده و جمع‌آورنده باید تقریباً متناسب با **$1/p$** افزایش یابد. این می‌تواند با فاصله‌گذارهای دی‌الکتریک **انعطاف‌پذیر و بادی** که کمی با افت فشار خارجی گسترش می‌یابند، یا با **مدولاسیون الکترونیکی** گرادیان‌های پتانسیل برای شبیه‌سازی شکاف‌های بزرگ‌تر، حاصل شود.

هر کاشی تلمتری — جریان، ولتاژ، شمارنده‌های قوس — به کنترل مرکزی گزارش می‌دهد. اگر کاشی قوس یا تخریب تجربه کند، خاموش و دور زده می‌شود. طراحی مدولار به معنای آن است که از دست رفتن کاشی‌های فردی به طور ناچیزی رانش کل را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

از شناوری به رانش

پرواز به آرامی شروع می‌شود. در پرتاب، کشتی هوایی با شناوری به استراتوسفر صعود می‌کند. در طول صعود، سیستم EAD در حالت قدرت پایین عمل می‌کند و رانش جزئی برای تثبیت و کنترل رانش فراهم می‌کند.

در حدود 30–40 کیلومتر ارتفاع، جایی که هوا رقیق اما هنوز برخوردکننده است، شتاب اصلی شروع می‌شود. کشتی هوایی به تدریج به پرواز افقی می‌چرخد و محور بلندش را در جهت حرکت مداری مورد نظر جهت می‌دهد.

ابتدا، رانش بین شتاب افقی و افزایش بالابر متعادل است. شناوری باقی‌مانده وسیله بیشتر وزن آن را جبران می‌کند؛ رانش EAD هر دو مؤلفه جلو و کمی رو به بالا فراهم می‌کند. با افزایش سرعت، بالابر دینامیک رشد می‌کند و شناوری ناچیز

می‌شود. انتقال صاف است — هیچ “لحظه تیک‌آف” وجود ندارد زیرا کشتی هوایی هرگز روی باند ننشسته بود.

صعود سه هفته‌ای

یک جرم وسیله نماینده $m = 2000 \text{ kg}$ را در نظر بگیرید. برای دستیابی به سرعت مداری $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ در $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$ (سه هفته)، رانش متوسط مورد نیاز

$$T = m \frac{v}{t} = 2000 \times \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 8.7 \text{ N}.$$

هشت نیوتن — وزن پرتقال کوچک — رانش کل مورد نیاز برای رسیدن به مدار است اگر به طور مداوم برای سه هفته اعمال شود.

اگر T/P سیستم 0.03 N/W باشد، معمولی عملیات EAD کارآمد در فشار پایین، تولید 8.7 N فقط حدود 290 W قدرت نیاز دارد. این به طرز شگفت‌آوری کوچک به نظر می‌رسد، و در عمل، تلفات اضافی درگ نیاز را به ده‌ها کیلووات افزایش می‌دهد. اما پنل‌های خورشیدی پوشش‌دهنده چند صد متر مربع می‌توانند آن را به راحتی فراهم کنند.

عامل ایمنی 100 را برای ناکارآمدی‌ها و درگ شامل کنیم: حدود 30 kW قدرت الکتریکی. با کارایی کلی 15% از نور خورشید به رانش، وسیله باید حدود 200 kW قدرت خورشیدی برداشت کند. این با حدود 700 متر مربع ناحیه خورشیدی فعال در 300 W/m^2 خروجی مطابقت دارد — ناحیه‌ای کوچک‌تر از زمین فوتبال، به راحتی روی کشتی هوایی 100 متری ادغام شده.

این حساب ساده نشان می‌دهد که جریان انرژی معقول است. آنچه موشک‌ها با چگالی قدرت به دست می‌آورند، کشتی هوایی با صبر و ناحیه به دست می‌آورد.

درگ و راهرو ارتفاع بالا

درگ همچنان چاه اصلی انرژی است. نیروی درگ $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$ است، و قدرت مربوطه $P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$.

در 50 کیلومتر، $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. اگر $A = 100 \text{ m}^2$ ، $C_D = 0.05$ ، و $v = 1000 \text{ m/s}$ ، آنگاه

$$P_D = 0.5 \times 10^{-3} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^6 \text{ W}$$

این 2.5 مگاوات است — خیلی بالا. اما در 70 کیلومتر، جایی که $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ ، همان پیکربندی فقط 25 kW قدرت درگ می‌دهد. بنابراین استراتژی: بالا برو در حالی که شتاب می‌گیری، ماندن روی مسیری که ρv^3 تقریباً ثابت بماند.

راهرو بهینه یکی با هوای که به طور مداوم رقیق می‌شود، شاید 40–80 کیلومتر ارتفاع، جایی که جو فقط چگالی خنثی کافی برای عملکرد EAD فراهم می‌کند اما به اندازه کافی کم برای نگه داشتن درگ قابل مدیریت.

کنترل وسیله و پایداری

بدون پروانه یا باله‌ها، پایداری از تقارن میدان می‌آید. فعال‌سازی دیفرانسیل کاشی‌ها گشتاور فراهم می‌کند. اگر کاشی‌های جلو سمت چپ کمی رانش بیشتری از سمت راست تولید کنند، وسیله به آرامی yaw می‌کند. کنترل پیچ با δ اس کاشی‌های بالا و پایین حاصل می‌شود. چون رانش به ازای هر کاشی کوچک است، پاسخ کند است، اما وسیله در رژیم عمل می‌کند که چابکی غیرضروری است.

حسگرهای وضعیت — ژيروسکوپ‌ها، شتاب‌سنج‌ها، ردیاب‌های ستاره — سیستم کنترل دیجیتال را تغذیه می‌کنند که جهت‌گیری برای حداکثر تابش خورشیدی و مسیر پرواز درست را حفظ می‌کند. اندازه عظیم وسیله و رژیم پرواز کند آن را به طور قابل توجه پایدار می‌کند.

ایمنی حرارتی و الکتریکی

عملیات EAD ده‌ها تا صدها کیلوولت در جریان پایین درگیر است. در هوای رقیق و خشک استراتوسفر، عایق متفاوت رفتار می‌کند: قوس‌ها می‌توانند مسافت‌های طولانی روی سطوح منتشر شوند. طراحی الکتریکی کشتی هوایی بنابراین کل ساختار را به عنوان سیستم پتانسیل کنترل شده درمان می‌کند. مسیرهای هادی تکراری هستند، با لایه‌های عایق که سلول‌های گاز را از خطوط HV جدا می‌کنند.

قوس‌ها فاجعه‌بار نیستند — تمایل به محلی و خودخاموش بودن دارند — اما می‌توانند به الکترودها آسیب بزنند. هر کاشی شکل موج جریان خود را نظارت می‌کند؛ اگر تخلیه spike کند، کنترلر ولتاژ را کاهش می‌دهد یا مازول آسیب‌دیده را برای چند ثانیه خاموش می‌کند.

از نظر حرارتی، نبود همرفت به معنای آن است که هر گرمایش محلی باید با هدایت به پنل‌های تابشی پخش شود. مواد برای emissivity بالا و جذب کم در فروسرخ انتخاب می‌شوند، اجازه می‌دهند حرارت اضافی به فضا تابش شود.

مقیاس‌پذیری و مدولاریته

سیستم tessellation مقیاس می‌گیرد، نه با افزایش ولتاژ. دو برابر کردن تعداد کاشی‌ها رانش را دو برابر می‌کند؛ نیازی به تخلیه‌های بزرگ‌تر نیست. این معماری را قابل مقیاس خطی از مدل‌های آزمایشگاهی به وسایل مداری می‌کند.

یک پروتوتایپ عملی ممکن است به عنوان پلتفرم کوچک پر از هلیوم با دوجین متر مربع سطح EAD شروع شود، رانش‌های میلی‌نیوتنی را بر ساعت‌ها اندازه‌گیری کند. نمایشگرهای بزرگ‌تر می‌توانند دنبال شوند، هر کدام در ناحیه و قدرت گسترش یابد. نسخه مداری نهایی ممکن است صدها متر گسترش یابد، با هزاران کاشی کنترل شده مستقل، عمل‌کننده تحت قدرت خورشیدی کامل برای ماه‌ها در یک زمان.

چون همه اجزا حالت جامد هستند، سیستم ذاتاً عمر خدماتی طولانی دارد. هیچ بلبرینگ توربین یا چرخه‌های احتراق برای فرسایش وجود ندارد — فقط فرسایش تدریجی الکترو و پیری مواد. با طراحی دقیق، زمان متوسط بین خرابی‌ها می‌تواند به سال‌ها برسد.

پروفایل‌های صعود و انتقال‌های ارتفاع

مأموریت کامل می‌تواند به عنوان مارپیچ صاف در صفحه (v, ρ) تصور شود: با افزایش سرعت، چگالی کاهش می‌یابد. مسیر طوری انتخاب می‌شود که محصول ρv^3 — که قدرت درگ را تعیین می‌کند — زیر آستانه‌ای که سیستم خورشیدی

می تواند تأمین کند، بماند.

1. صعود شناور به 30-40 کیلومتر.
2. فاز شتاب : حفظ تقریباً $P_D \approx 20-50 \text{ kW}$ با تنظیم پیچ و ارتفاع.
3. انتقال به رژیم مداری : بالای 70 کیلومتر، بالابر و شناوری ناپدید می شود، و کشتی هوایی عملاً به ماهواره ای تبدیل می شود که هنوز جو را می خراشد.

انتقال از “پرواز” به “مدار” مرز تیزی نیست. جو به تدریج محو می شود؛ رانش برای درگ جبران می کند تا درگ بی اهمیت شود. مسیر وسیله دایره ای به جای بالستیک می شود، و آن در هوا نامحدود می ماند.

تبادل انرژی و استقامت

انتگرال بر صعود کامل، ورودی انرژی کل از خورشید نسبت به آنچه لازم است، وسیع است. حتی در نرخ جمع آوری متواضع 100 kW، سه هفته عملیات مداوم انباشته می کند

$$E = 100,000 \times 1.8 \times 10^6 = 1.8 \times 10^{11} \text{ J.}$$

برای وسیله 2000 کیلوگرمی، این 90 MJ/kg است — سه برابر نیاز انرژی جنبشی مداری. بیشتر این انرژی به درگ و ناکارآمدی ها از دست می رود، اما حاشیه سخاوتمندانه است.

این جادوی آرام صبر خورشیدی است: وقتی زمان اجازه کشیده شدن دارد، فراوانی انرژی کمبود قدرت را جایگزین می کند.

نگهداری، بازگشت، و استفاده مجدد

پس از تکمیل مأموریت مداری، کشتی هوایی می تواند به تدریج با معکوس کردن قطبیت میدان EAD کند شود. درگ با فرود افزایش می یابد؛ همان مکانیسمی که آن را بلند کرد حالا به عنوان ترمز عمل می کند. وسیله می تواند به استراتوسفر بازگردد و زیر شناوری باقی مانده شناور شود.

چون هیچ مرحله مصرفی دور ریخته نمی شود، سیستم کاملاً قابل استفاده مجدد است. پوشش می تواند سرویس شود، دوباره گازگیری شود، و دوباره پرتاب شود. نگهداری شامل جایگزینی کاشی ها یا فیلم های تخریب شده به جای بازسازی موتورها است.

در مقابل موشک های شیمیایی، جایی که هر پرتاب مخزن ها و سوخت ها را مصرف می کند، کشتی هوایی EAD فضایی باز یافت انرژی است. خورشید آن را به طور مداوم سوخت رسانی می کند؛ فقط سایش و پارگی نیاز به دخالت انسانی دارد.

اهمیت مهندسی گسترده تر

همان فناوری هایی که کشتی هوایی EAD خورشیدی را ممکن می کنند — فوتوولتائیک های سبک، الکترونیک قدرت و لثاژ بالا، دی الکتریک های فیلم نازک — کاربردهای زمینی فوری دارند. پلتفرم های ارتباطی استراتوسفری، حسگرهای آب و هوایی ارتفاع بالا، و پهپادهای استقامت طولانی همه از همان پیشرفت ها سود می برند.

با پیگیری سیستمی قادر به رسیدن به مدار بدون سوخت، همچنین کلاس جدیدی از وسایل هوایی حالت جامد — ماشین‌هایی که نه با احتراق بلکه با دستکاری میدان پرواز می‌کنند — اختراع می‌کنیم.

در این معنا، پروژه Rise-Fly-Orbit در خطی قرار می‌گیرد که شامل Wright Flyer و اولین موشک‌های سوخت مایع است: نه فناوری کامل‌شده، بلکه اثبات اصل که تحول می‌دهد “پرواز” چه معنایی می‌تواند داشته باشد.

مقررات، استراتژی، و فلسفه صعود آهسته

فیزیک کشتی هوایی الکتروآئرودینامیک خورشیدی permissive است؛ قانون نیست. قوانین پرواز فعلی آسمان را به دامنه‌های محدود تمیز تقسیم می‌کنند: فضای هوایی اداره‌شده توسط قانون هوانوردی، و فضای بیرونی اداره‌شده توسط قانون فضایی. بین آنها ناحیه خاکستری — خیلی بالا برای صدور گواهینامه هواپیما، خیلی پایین برای ثبت مداری — قرار دارد. کشتی هوایی به مدار دقیقاً در آن خاکستری زندگی می‌کند، به طور مداوم از ارتفاع‌هایی عبور می‌کند که، روی کاغذ، به هیچ دسته‌ای تعلق ندارند.

چرا “غیرممکن” است

قوانین فضای هوایی وسایل نقلیه‌ای فرض می‌کنند که در ساعت‌ها بلند می‌شوند و فرود می‌آیند. نیاز به موتورهای گواهی‌شده، سطوح کنترل آیرودینامیک، و توانایی تسلیم به ترافیک دارند. هیچ‌کدام از این فرضیات با بالون خودکار خورشیدی‌رانده که ممکن است هفته‌ها بالای 60 کیلومتر بماند، مطابقت ندارد.

مقررات وسایل پرتاب جایی شروع می‌شود که موشک‌ها روشن می‌شوند: یک اشتعال گسسته، سایت پرتاب، و سیستم پایان پرواز طراحی‌شده برای مهار انفجارها. کشتی هوایی ما هیچ‌کدام از اینها را ندارد. به آرامی مانند ابر صعود می‌کند؛ هیچ “لحظه پرتاب” وجود ندارد. با این حال، چون در نهایت Mach 1 را فراتر می‌رود و به سرعت مداری می‌رسد، تحت صلاحیت پرواز فضایی می‌افتد. نتیجه پارادوکسیکال است: نمی‌تواند به عنوان هواپیما قانونی پرواز کند، اما باید به عنوان موشکی که شبیهش نیست، مجوز بگیرد.

کلاس وسیله آتمسفری-مداری هیبریدی

درمان، شناخت کلاس جدیدی است — وسیله آتمسفری-مداری هیبریدی (HAOV). ویژگی‌های تعریف‌کننده‌اش عبارتند از:

- عبور دامنه مداوم: صعود از سطح به فضای نزدیک بدون مراحل گسسته.
- جریان انرژی جنبشی پایین: تبادل کل تکانه با جو بسیاری سفارش‌های بزرگی زیر موشک‌ها.
- رفتار شکست ایمن غیرفعال: در از دست دادن قدرت، وسیله رانش می‌کند و فرود می‌آید؛ بالستیک نمی‌افتد.
- ردیابی مشارکتی: همیشه قابل مشاهده برای رادار و حسگرهای ماهواره‌ای، پخش بردار وضعیتش مانند ترانسپوندرهای ADS-B برای هواپیماها.

چارچوب HAOV صدور گواهینامه چنین وسایلی را تحت معیارهای مبتنی بر عملکرد به جای مبتنی بر سخت‌افزار مجاز می‌کند — تعریف ایمنی در اصطلاحات انتشار انرژی، ردپای زمین، و قابلیت فرود خودکار به جای حضور موتورها یا سوخت.

راهروها اقیانوسی یا بیابانی می‌توانند تعیین شوند که HAOV ها بتوانند به طور مداوم عمل کنند، نظارت شده توسط شبکه‌های موجود ترافیک فضایی. صعودشان خطر کمتری برای هوانوردی از یک بالن هواشناسی واحد دارد، اما قوانین فعلی هیچ مسیری برایشان ارائه نمی‌دهند.

سیاست صبر

مقررات فرهنگ را دنبال می‌کند، و فرهنگ به سرعت معتاد است. نقاط عطف هوافضا در نسبت‌های رانش-به-وزن و دقیقه‌ها به مدار اندازه‌گیری می‌شوند. ایده اینکه وسیله سه هفته برای رسیدن به مدار بگیرد، در شنیدن اول، مانند پسرفت به نظر می‌رسد. اما صبر قیمت پایداری است. کشتی هوایی معیار متفاوتی پیشنهاد می‌کند: نه “چقدر سریع انرژی می‌سوزانیم” بلکه “چقدر مداوم آن را انباشته می‌کنیم.”

برای آژانس‌های فضایی عادت‌کرده به پنجره‌های پرتاب و شمارش معکوس، چنین وسیله‌ای تغییر در عملیات را تقاضا می‌کند: برنامه‌ریزی مأموریت بر اساس فصل‌ها به جای ثانیه‌ها؛ درج‌های مداری که به هندسه خورشیدی بستگی دارند، نه در دسترس بودن پلتفرم. با این حال، این تغییر با چرخش گسترده‌تر به زیرساخت حالت پایدار — فضایی‌های خورشیدی-الکتریکی، ایستگاه‌های قابل استفاده مجدد، پلتفرم‌های آب و هوایی پایدار — همخوانی دارد.

ارزش استراتژیک

وسیله خورشیدی-EAD قابل استفاده مجدد قابلیت‌هایی ارائه می‌دهد که هیچ موشک یا هواپیمایی نمی‌تواند مطابقت دهد:

- مشاهده و ارتباطات ارتفاع بالا پایدار: قبل از مدار کامل، کشتی هوایی می‌تواند ماه‌ها در استراتوسفر فوقانی شناور بماند، داده‌ها را رله کند یا زمین را تصویربرداری کند.
- تحویل بار افزایشی: بارهای کوچک می‌توانند به آرامی بدون شوک‌های صوتی و حرارتی پرتاب بلند شوند.
- آنالوگ‌های سیاره‌ای: در مریخ، جایی که سرعت مداری فقط 3.6 کیلومتر/ثانیه است و فشار جوی شتاب یونی مسیر بلند را ترجیح می‌دهد، همان معماری می‌تواند حتی بهتر عمل کند.
- حفاظت محیطی: بدون اگزوز، بدون نشت سوخت، تأثیر صوتی ناچیز.

از نظر اقتصادی، اولین HAOV های عملیاتی موشک‌ها را جایگزین نمی‌کنند بلکه مکمل‌شان می‌کنند، سرو نیش‌هایی که صبر بار مفید بر فوریت غالب است. از نظر استراتژیک، دسترسی به فضای نزدیک را از زنجیره‌های تأمین سوخت جدا می‌کند — ویژگی جذابی برای آژانس‌های فضایی به دنبال زیرساخت پایدار.

مهندسی کتاب قوانین

ایجاد کلاس HAOV کمتر لابی‌گری است تا اندازه‌گیری. تنظیم‌کننده‌ها به داده‌ها اعتماد دارند. مسیر جلو شفافیت تجربی است:

1. نمایشگرهای مبتنی بر هلیوم در راهروهای دورافتاده، مجهز به ثبت مسیر، مصرف انرژی، و رفتار خرابی.
2. تلمتری مداوم به اشتراک گذاشته‌شده با شبکه‌های هوانوردی مدنی و ردیابی فضایی برای اثبات دینامیک‌های پرواز قابل پیش‌بینی.

3. شبیه‌سازی و مدل‌های ریسک نشان‌دهنده اینکه جریان انرژی جنبشی بدترین مورد بر مناطق مسکونی ناچیز است.

وقتی آژانس‌ها شواهد کمی ببینند که HAOV نمی‌تواند به هواپیماها یا جمعیت‌های زمینی آسیب بزند، معماری قانونی دنبال خواهد شد — همانطور که برای بالن‌های ارتفاع بالا و پهپادها قبل از آنها کرد.

بعد اخلاقی

پرواز آهسته وزن اخلاقی دارد. پرتابگرهای شیمیایی آلوده می‌کنند نه چون مهندسان بی‌احتیاط هستند بلکه چون فیزیک زمانی برای بازیافت حرارت‌شان ارائه نمی‌دهد. کشتی هوایی خورشیدی، برعکس، چیزی غیرقابل بازیابی مصرف نمی‌کند. سر و صدا را با سکوت، فلاش با درخشش جایگزین می‌کند. صعودش از زمین به عنوان نقطه‌ای درخشان و بی‌عجله قابل مشاهده خواهد بود، مصنوع انسانی که بدون خشونت بالا می‌رود.

در عصری از فوریت، چنین حرکتی عمدی بیانیه است: که جاه‌طلبی فناوری نیازی به انفجاری بودن برای عمیق بودن ندارد.

صبر نور

وقتی موشک به مدار می‌رسد، با شتاب خام می‌کند: ثانیه‌های احتراق که آسمان را لرزانده می‌کند. کشتی هوایی الکتروآرودینامیک متفاوت می‌رسد. هر فوتونی که پوستش را می‌زند، زمزمه‌ای از تکانه کمک می‌کند، توسط الکترون‌ها، یون‌ها، و ریاضیات آرام معادلات ماکسول واسطه‌گری شده. بر سه هفته این زمزمه‌ها به مدار انباشته می‌شوند.

همان عبارت — $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ — که میکروآمپر رانش یونی در آزمایشگاه را توصیف می‌کند، بدنه بالابر هزار تنی را که از جو فوقانی می‌گذرد نیز اداره می‌کند. مقیاس تغییر می‌کند؛ اصل نه. تنسور ماکسول، قانون کولن، و صبر نور خورشید جهانی هستند.

اگر بشریت یاد بگیرد آن صبر را بهره‌برداری کند، راه جدیدی برای ترک زمین به دست می‌آوریم — یکی که می‌تواند نامحدود تکرار شود، توسط همان ستاره‌ای که ما را حفظ می‌کند، قدرت‌مند شده.

به سوی عصر پرواز برگشت‌پذیر

موشک‌شناسی شیمیایی ژستی یک‌طرفه است: تلاش عظیم برای رسیدن به مدار، و پایان ناگهانی بر ورود مجدد. کشتی هوایی الکتروآرودینامیک مسیر برگشت‌پذیر پیشنهاد می‌کند. می‌تواند به اراده بالا و پایین برود، در هر جایی از تروپوسفر به مدار ساکن شود. هم فضاپیما و هم زیستگاه، وسیله و ایستگاه است.

در آن پیوستاری، وارونگی فلسفی نهفته است: پرواز فضایی نه به عنوان جدایی بلکه به عنوان گسترش جو. گرادیان از هوا به خلأ به زمین قابل پیمایش تبدیل می‌شود. چنین وسایلی خط بین هواشناسی و فضاوردی را محو می‌کنند، “لبه فضا” را به فضای کاری زنده به جای مانع تبدیل می‌کنند.

تأملات پایانی

هیچ فیزیک جدیدی لازم نیست — فقط استقامت، دقت، و مقررات بازتصور شده. بودجه انرژی مداری می‌تواند با نور خورشید پرداخت شود؛ رانش می‌تواند از میدان‌های الکتریکی عمل‌کننده بر یون‌ها ناشی شود؛ زمان می‌تواند از صبر

مهندسان قرض گرفته شود.

مانع‌ها فرهنگی و بوروکراتیک هستند: متقاعد کردن آژانس‌ها که چیزی شبیه بالون می‌تواند، از طریق ریاضیات و پایداری، به ماهواره تبدیل شود. با این حال، هر فناوری تحول‌آفرین به عنوان ناهنجاری در کاغذبازی شروع شد.

وقتی اولی از این کشتی‌های الکتروآئرودینامیک خورشیدی صعود کند، پیشرفتش ساعت به ساعت تقریباً نامحسوس خواهد بود. اما روز به روز سرعت جمع می‌کند، تا در نهایت فراتر از دسترس آب و هوا سر بخورد. هیچ غرشی نخواهد بود — فقط زمزمه ضعیف و مداوم میدان‌ها و انباشت پایدار نور خورشید به حرکت.

این آغاز دسترسی قابل استفاده مجدد، پایدار، و ملایم به مدار را علامت‌گذاری می‌کند: راهی برای صعود، پرواز، و — بدون زدن هرگز کبریت — مدار زدن.

منابع و خواندن بیشتر

- پروژه **Rise Fly Orbit**: <https://riseflyorbit.org> — مروری بر مفهوم کشتی هوایی خورشیدی به مدار و تحقیقات مرتبط.
- مقاله پیش‌رانش الکتروآئرودینامیک: https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html — درمان نظری عمیق رانش الکتروآئرودینامیک با استفاده از تنسور تنش ماکسول و فرمول‌بندی نیروی بدنی کولن.
- Barrett, S. et al., **Nature** (2018). “Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion.” — اولین نمایش هواپیمای بال ثابت با پیش‌رانش یونی حالت جامد.
- Paschen, F. (1889). “Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure erforderliche Potentialdifferenz.” **Annalen der Physik**, 273(5).
- Sutton & Biblarz, **Rocket Propulsion Elements**, 9th ed — برای مقایسه در بودجه‌های انرژی و ملاحظات Δv .
- NASA Glenn Research Center, “Solar Electric Propulsion Basics.” — زمینه بر سیستم‌های پیش‌رانش الکتریکی خورشیدی با کارایی بالا.