https://farid.ps/articles/rise_fly_orbit/ur.html

اُٹھو، اڑو، مدار

خلائی رسائی کے لیے پائیدار رسائی کے لیے شمسی توانائی سے چلنے والا الیکٹروایئروڈائنامک ہوائی جہاز

وژن اور جسمانی بنیاد

اڑنے کا خواب ہمیشہ صبر اور طاقت کے درمیان ایک مقابلہ رہا ہے۔ اٹھارہویں صدی کے ابتدائی غبارہ سوار ہلکے گیسوں کا استعمال کرتے ہوئے آسمان کی طرف آہستہ آہستہ اُٹھے، جبکہ بیسویں صدی کے راکٹ انجینئرز نے اسے آگ سے پھاڑ دیا۔ دونوں طریقوں کا ایک ہی مقصد ہے — کشش ثقل کی جبر سے فرار — لیکن فلسفہ میں بنیادی طور پر مختلف ہیں۔ ایک ہوا کو ساتھی کے طور پر استعمال کرتا ہے؛ دوسرا اسے رکاوٹ سمجھتا ہے۔ ان دو انتہاؤں کے درمیان تیسرا راستہ ہے، جو عملی طور پر ابھی تک حاصل نہیں ہوا ہے لیکن اصول کے طور پر اب ناممکن نہیں ہے: ایک **شمسی توانائی سے چلنے والا ہوائی جہاز جو مدار تک اڑ سکتا ہے**، پہلے تیراکی سے اُٹھتا ہے، پھر ہوائی دھارا کی مدد سے، اور آخر میں مرکز سے دور ہونے والی قوت کی مدد سے، سب کچھ کیمیائی ایندھن کے بغیر۔

اس تصور کا مرکز **الیکٹروایئروڈائنامک (EAD) پیش رفت** ہے — ایک قسم کی برقی دھکیل جو برقی میدانوں کا استعمال کرتے ہوئے ہوا میں آئنز کو تیز کرتی ہے۔ تیز آئنز نیوٹرل مالیکیولز کو گتی منتقل کرتے ہیں، جس سے بڑے پیمانے پر بہاؤ اور الیکٹروڈز پر خالص دھکیل پیدا ہوتی ہے۔ راکٹ کے برعکس، جو ردعمل کی ماس لے جانا چاہیے، یا پروانہ، جو حرکت پذیر پتوں کی ضرورت رکھتا ہے، الیکٹروایئروڈائنامک پیش رفت **بغیر حرکت پذیر حصوں اور بغیر جہاز پر اخراج** کام کرتی ہے، صرف سورج کی روشنی اور ہوا کے ساتھ۔ جب اعلیٰ کارکردگی والی شمسی صف بندی سے جڑی ہوئی اور بڑے، الٹرا ہلکے اٹھانے والے جسم پر نصب کی جائے، تو یہ اوپری فضا میں مسلسل تیزی کے لیے گمشدہ جزو فراہم کرتی ہے، جہاں مزاحمت کم ہے لیکن ہوا اب بھی موجود ہے۔

یہ تجویز بیان کرنے میں سادہ ہے لیکن عمل میں مشکل:

1. **اُٹھو** — ہائیڈروجن یا ہیلیم سے بھرا ہوا تیراکی والا ہوائی جہاز، موسم اور ہوائی ٹریفک سے دور سٹریٹوسفیئر میں غیر فعال طور پر اُٹھتا ہے۔
2. **اڑو** — ہوائی جہاز EAD دھکیل کا استعمال کرتے ہوئے افقی طور پر تیز ہوتا ہے، مزاحمت کو کم کرنے کے لیے مزید پتلی ہوا کی طرف آہستہ آہستہ چڑھتے ہوئے رفتار بڑھاتا ہے۔
3. **مدار** — مسلسل تیز ہونے کے ہفتوں کے بعد، مرکز سے دور ہونے والی قوت کشش ثقل کو متوازن کرتی ہے؛ گاڑی کو اب لفٹ کی ضرورت نہیں رہتی، جو پھٹنے کی بجائے استقامت سے سیٹلائٹ بن جاتی ہے۔

یہ خیالی خیالی نہیں ہے۔ ہر قدم معلوم فزکس میں جڑا ہوا ہے: تیراکی، شمسی توانائی، برقی مقناطیسیت اور مدار میکینکس۔ جو بدلتا ہے وہ وقت کی پیمانہ ہے۔ جلنے کے منٹوں کی بجائے، ہم **سورج کی روشنی کے ہفتوں** پر غور کرتے ہیں۔ ٹنوں ایندھن کی بجائے، ہم **میدانوں اور صبر** پر بھروسہ کرتے ہیں۔

مدار کی توانائی

ہر خلائی پرواز کی بحث توانائی سے شروع اور ختم ہوتی ہے۔ زمین کے گرد دائرہ وار مدار کو برقرار رکھنے کے لیے درکار ماس فی کلو گرام kinetik توانائی

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

درکار، جہاں v مدار کی رفتار ہے۔ کم زمینی مدار کے لیے $v \approx 7.8 \times 10^3\ \text{m/s}$، لہذا $E_k \approx 3.0 \times 10^7\ \text{J/kg}$، یا تقریباً **ہر کلو گرام 30 میگاجول**۔ یہ مدار میں رکھے گئے ہر کلو گرام کے لیے تقریباً 1 کلو گرام گیسولین جلانے کی توانائی کے برابر ہے۔ یہ ایک بڑا نمبر ہے، لیکن فلکی طور پر بڑا نہیں۔

اب اسے زمینی فضا کے اوپری حصے میں مسلسل شمسی بہاؤ سے موازنہ کریں: تقریباً **1,360 واٹ فی مربع میٹر**۔ اگر ہم دنوں یا ہفتوں میں اس کا ایک چھوٹا سا حصہ kinetik توانائی میں تبدیل کر سکیں، تو ہم اصول کے مطابق مطلوبہ مدار توانائی فراہم کر سکتے ہیں۔ جدید اعلیٰ کارکردگی فوٹو وولٹک آرے kg فی کلو گرام صدیوں واٹ کی مخصوص طاقت رکھتے ہیں۔
$P_{\text{sp}} = 300\ \text{W/kg}$ پر، 1 kg آرے ہر سیکنڈ 300 جوول پیدا کرتا ہے۔ ایک دن (8.64×10^4 سیکنڈ) میں، یہ 2.6×10^7 جوول ہے — 1 kg ماس کی مدار توانائی کے برابر۔

یہ سادہ موازنہ اس نقطہ نظر کی منطق کو ظاہر کرتا ہے۔ مدار کی توانائی، دوری فی کلوگرام تقریباً ایک دن سورج سے دستیاب ہے، اگر اسے موثر طریقے سے دھکیل میں تبدیل کیا جا سکے۔ عملی چیلنج یہ ہے کہ مزاحمت اور ناکارآمدیزی کا زیادہ تر حصہ جذب کر لیتے ہیں۔ حل ارتفاع اور صبر ہے: مزاحمت کم ہونے والی پتلی ہوا میں کام کریں، اور عمل کو گھنٹوں کی بجائے ہفتوں میں پھیلائیں۔

وقت کو ایندھن سے بدلنا

راکٹ مزاحمت کی پریشانی کو وحشی طاقت سے حل کرتے ہیں — وہ اتنی تیزی سے جاتے ہیں کہ ہوا غیر متعلق ہو جاتی ہے۔ ہوائی جہاز، برعکس، ہوا کے ساتھ کام کرتے ہیں؛ وہ ٹھہر سکتے ہیں۔ اگر وقت کو خرچ ہونے والا وسائل سمجھا جائے، تو یہ ایندھن کی ماس کو تبدیل کر سکتا ہے۔ ہوائی جہاز کا کام لمبے ادوار میں چھوٹی مگر مسلسل تیز ہونے کو برقرار رکھنا ہے، شاید $10^{-3}\ \mathrm{m/s^2}$ کی ترتیب میں، جب تک مدار کی رفتار حاصل نہ ہو۔

اگر مدار تک کا چڑھنا تین ہفتے لے، یا تقریباً 1.8×10^{6} سیکنڈ، تو مطلوبہ اوسط تیز ہونے

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

— زمین کی کشش ثقل کا نصف ہزارواں سے کم۔ اس قسم کی تیز ہونے ہوائی جہاز کے لیے آسانی سے برداشت ہو سکتی ہیں؛ وہ کوئی ساختاتی تناؤ نہیں ڈالتے۔ واحد دشواری اسے برقرار رکھنا ہے، ہر اکائی طاقت دستیاب دھکیل کی چھوٹی مقدار کو دیکھتے ہوئے۔

اگر گاڑی کی ماس $10^{3}\ \mathrm{kg}$ ہے، تو $4 \times 10^{-3}\ \mathrm{m/s^2}$ کی اوسط تیز ہونے صرف تقریباً 4 نیوٹن خالص دھکیل کی ضرورت ہے — ایک سیب کے وزن سے کم۔ ایک سیب کی دھکیل سے مدار تک پہنچنے کی ظاہری بے معنی پن، جب وقت کو ہفتوں تک پھیلانے کی اجازت دی جائے تو غائب ہو جاتا ہے۔

تیراکی اور پتلی ہوا کی طرف راستہ

ہوائی جہاز، ہوا سے ہلکے کسی بھی آلے کی طرح، اپنی سفر شروع کرتا ہے: ہلکے گیس سے ہوا کو منتقل کر کے۔ تیراکی کی قوت

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

درکار، جہاں V گیس کی حجم اور ρ متعلقہ کثافتیں ہیں۔ سمندر کی سطح کے قریب، $\rho_{\text{air}} \approx 1.2\ \text{kg/m}^3$، $\rho_{\text{He}} \approx 0.18\ \text{kg/m}^3$، اور $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09\ \text{kg/m}^3$۔ ہائیڈروجن تھوڑی زیادہ اٹھان فراہم کرتا ہے، تقریباً **1.1 kg فی کیوبک میٹر**، ہیلیم کے **1.0 kg فی کیوبک میٹر** کے مقابلے میں۔ فرق چھوٹا لگتا ہے لیکن ہزاروں کیوبک میٹر پر جمع ہوتا ہے۔

لہذا ہائیڈروجن ایک ماپنے کے قابل کارکردگی کا فائدہ دیتا ہے، حالانکہ جلن کی قیمت پر۔ اسے سخت برقی زون بندی اور وینٹیلیشن پروٹوکولز کی ضرورت ہے، خاص طور پر کیونکہ گاڑی اعلیٰ وولٹیج الیکٹروسٹیٹک سسٹمز بھی لے جاتی ہے۔ ہیلیم کم اٹھان دیتا ہے لیکن مکمل طور پر غیر فعال ہے۔ دونوں گیسیں قابل عمل ہیں؛ انتخاب مشن کی خطرے برداشت کرنے کی صلاحیت پر منحصر ہے۔ ابتدائی عوامی یا آبادی والے علاقوں کے ٹیسٹوں کے لیے، ہیلیم ترجیحی ہے۔ دور دراز یا مدار کوششوں کے لیے، ہائیڈروجن مناسب ہو سکتی ہے۔

گاڑی کے ساتھ، ہوا کی کثافت تقریباً $H \approx 7.5\ \text{km}$ کے پیمانہ کی بلندی کے ساتھ انڈیکس طور پر گرتی ہے۔ 30 کلومیٹر پر، کثافت سمندر کی سطح کی تقریباً $1/65$ ہے؛ 50 کلومیٹر پر $1/300$۔ تیراکی اس کے مطابق کمزور ہو جاتی ہے، لیکن مزاحمت بھی۔ گاڑی سورج کی شدت اب بھی زیادہ رہنے والی مگر متحرک دباؤ کم ترین — سٹریٹوسفیئر میں تقریباً 30–40 کلومیٹر — کی بلندی پر **غیر جانبدار تیراکی** تک پہنچنے کے لیے ڈیزائن کی گئی ہے۔ وہاں سے، افقی تیز ہونے شروع ہوتی ہے۔

اٹھانا، مزاحمت، اور متحرک دباؤ

تیز ہونے کے دوران بلندی برقرار رکھنے کے لیے، ہوائی جہاز جزوی طور پر **ہوائی دھارا اٹھانا** پر انحصار کر سکتا ہے۔ اٹھانا جسم کے لیے، اٹھانا اور مزاحمت قوتیں

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

جہاں A حوالہ جگہ، C_L اور C_D اٹھانا اور مزاحمت کی ضرب۔ کیونکہ ρ بلندی پر چھوٹی ہے، یہ قوتیں چھوٹی ہیں؛ گاڑی **بڑی جگہ** اور **کم وزن** سے تلافی کرتی ہے۔

مناسب $L/D = C_L/C_D$ ہوائی دھارا اڑنے کی کارکردگی کا تعین کرتا ہے۔ جدید گلائیڈرز گاڑھے ہوا میں $L/D = 50$ تجاوز کر سکتے ہیں۔ انتہائی ہموار پن اور کم سے کم ضمائم والا الٹرا ہلکا ہوائی جہاز، پتلی ہوا میں بھی 10–20 مؤثر L/D برقرار رکھ سکتا ہے۔ لیکن جب ہوا مزید پتلی ہو جائے، تو مدار اڑنے کی طرف منتقلی اٹھانا سے محدود نہیں — **مزاحمت طاقت** سے ادارہ ہوتا ہے۔

مزاحمت پر قابو پانے کے لیے درکار طاقت

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

رفتار کے مکعب کے ساتھ پیمانہ کرتی ہے۔ اسی لیے راکٹ تیزی سے تیز ہوتے ہیں: اگر وہ رک جائیں، تو مزاحمت ان کی توانائی کو انڈیکس طور پر کھپت کرتا ہے۔ ہوائی جہاز مخالف راستہ لیتا ہے: ρ اتنا چھوٹا جہاں تیز ہوتا ہے کہ P_D سیکنڈ میں کلومیٹرز پر بھی محدود رہتا ہے۔

مثال کے طور پر، $\rho = 10^{-5}\ \text{kg/m}^3$ (60 کلومیٹر بلندی کے قریب عام)، $A = 100\ \text{m}^2$، $C_D = 0.05$، اور $v = 1.000\ \text{m/s}$، تو

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

یعنی 25 کلوواٹ — آسانی سے شمسی رسائی میں۔ اس کے برعکس، سمندر کی سطح پر وہی ترتیب 25 گیگاواٹ کی ضرورت ہوگی۔

قاعدہ سادہ ہے: **پتلی ہوا وقت خریدتی ہے، اور وقت ایندھن کی جگہ لیتا ہے** ۔

الیکٹروایئروڈائنامک موقع

20ویں صدی کے شروع میں، فزکس دانوں نے دیکھا کہ ہوا میں تیز الیکٹروڈز کے قریب مضبوط برقی میدان ایک ہلکی نیلی کرونا اور ایک ہلکی ہوا کی بہاؤ پیدا کرتے ہیں۔ یہ "برقی ہوا" آئنز اور نیوٹرلز کے درمیان گتی کی منتقلی سے پیدا ہوتی ہے۔ یہ زیادہ تر تجسس کے طور پر سمجھا گیا جب تک کہ اعلیٰ وولٹیج الیکٹرانکس بالغ نہ ہوئی۔ جب مناسب ترتیب دی جائے، تو اثر ماپنے کے قابل دھکیل پیدا کر سکتا ہے۔

الیکٹروایئروڈائنامک پیش رفت آئنز پیدا کرنے والے پتلی تار یا کنارے **ایمیٹر** اور انہیں حاصل کرنے والے وسیع الیکٹروڈ کو **لیکٹر** کے درمیان اعلیٰ وولٹیج لگا کر کام کرتی ہے۔ آئنز برقی میدان میں تیز ہوتے ہیں، نیوٹرل ہوا مالیکیولز سے ٹکراتے ہیں اور گیس کو آگے کی گتی دیتے ہیں۔ آلہ برابر اور مخالف دھکیل محسوس کرتا ہے۔

ابتدائی مظاہروں متواضع ہونے کے باوجود، حالیہ تجربات — 2018 میں MIT کے ذریعہ اڑایا گیا ایک **فکسڈ ونگ آئن طیارہ** شامل — نے ثابت کیا کہ مستحکم، خاموش اڑنا ممکن ہے۔ تاہم، خیال اس سنگ میل سے پہلے کا ہے۔ برسوں پہلے، **Maxwell**-

ٹینسر پر مبنی فارمولیشنز پر تحقیق نے دکھایا کہ وہی فزکس بڑی جیومیٹریز اور پتلی ہوا میں پیمانہ کی جا سکتی ہے۔ اس فارمولیشن میں، دھکیل "ہوا" dan değil، الیکٹرو میگنیٹک تناؤ dan doğar, ڈسچارج علاقے کی حجم پر انٹیگریٹ کی گئی۔

متعلقہ مساوات Maxwell تناؤ ٹینسر $\mathbf{T}$ سے اخذ کی جاتی ہے، جو الیکٹرو سٹیٹک فیلڈ کے لیے

$$\mathbf{T} = \varepsilon \left(\mathbf{E}\mathbf{E} - \tfrac{1}{2} E^2 \mathbf{I} \right)$$

جہاں ε ماحول کی اجازت، $\mathbf{E}$ برقی میدان وکٹر، اور $\mathbf{I}$ شناخت ٹینسر ہے۔ کسی جسم پر خالص الیکٹرو میگنیٹک قوت، اس کی سطح پر اس ٹینسر کو انٹیگریٹ کر کے حاصل کی جاتی ہے:

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

آئنز شدہ علاقے میں، یہ ایک **حجم قوت کی کثافت** کو سادہ بناتا ہے

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \tfrac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon ،$$

جہاں ρ_e مقامی چارج کی کثافت ہے۔ تقریباً یکساں اجازت والے گیس میں، دوسرا ٹرم غائب ہو جاتا ہے، خوبصورت **Coulomb جسم قوت** چھوڑ کر

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

یہ کمپکٹ اظہار الیکٹرو ایئرو ڈائنامک پیش رفت کا جوہر ہے: جہاں بھی برقی میدان اور خلائی چارج ہم آہنگی سے موجود ہوں، خالص جسم قوت ماحول پر کام کرتی ہے۔

آئنز خود کم ہیں، لیکن ان کی گتی ٹکراؤ کے ذریعے نیوٹرلز تک منتقل ہوتی ہے۔ ٹکراؤ کے درمیان اوسط فری راستہ λ یہ طے کرتا ہے کہ گتی کس طرح پھیلتی ہے؛ دباؤ کے الٹ تناسب میں پیمانہ کرتا ہے۔ کم دباؤ پر، آئنز ٹکراؤ فی دور سفر کرتے ہیں، اور گتی کی منتقلی کی کارکردگی بدل جاتی ہے۔ ایک **ایڈیل دباؤ بینڈ** ہے جہاں آئنز گیس کو دھکیلنے کے لیے کافی بار بار ٹکرا سکتے ہیں لیکن اسے گرم کر کے توانائی ضائع نہ کریں۔ زمینی فضا کے لیے، یہ بینڈ کچھ تورر سے کچھ ملی ٹورر تک — بالکل 40 سے 80 کلومیٹر بلندی کے درمیان کا رینج — ہے۔

ہوائی جہاز کا لفافہ، اس طرح، قدرتی ماحول میں کام کرنے والے الیکٹرو ایئروڈائنامک ٹائلز کے لیے مثالی میزبان بن جاتا ہے۔ فضا خود رد عمل کی ماس ہے۔

الیکٹرو ایئروڈائنامک پیش رفت کی فزکس

پہلی نظر میں، الیکٹرو ایئروڈائنامک پیش رفت ناممکن لگتی ہے۔ خاموش، بے حرکت ایک سیٹ الیکٹروڈز کا ہوائی جہاز کو منتقل کرنے کے لیے کافی طاقتور دھکیل پیدا کر سکے، روزمرہ تجربے سے متصادم لگتا ہے۔ نظر آنے والی رد عمل کی ماس یا حرکت پذیر مشینری کی عدم موجودگی، فطری سمجھ کو چیلنج کرتی ہے۔ تاہم، برقی میدان میں بہنے والا ہر آئن گتی لے جاتا ہے، اور گتی محفوظ ہے۔ میدان ایک نامرئی لیور کی طرح کام کرتا ہے، اور ہوا اس کا کام کرنے والا سیال ہے۔

اس رجحان کی بنیادیں عجیب پلازما فزکس میں نہیں، بلکہ **Maxwell مساواتوں** میں اور ان کی مکینیکل اظہار، **Maxwell تناؤ ٹینسر** میں جڑی ہیں۔ یہ ٹینسر فارمولیشن یہ واضح کرتی ہے کہ برقی میدان صرف ممکنہ پیٹرن نہیں ہیں — وہ ارد گرد ماحول میں مکینیکل تناؤ ذخیرہ کرتے اور منتقل کرتے ہیں۔

میدان تناؤ اور Coulomb جسم قوت

Maxwell تناؤ ٹینسر الیکٹرو سٹیٹکس میں

$$\mathbf{T} = \varepsilon \left(\mathbf{E}\mathbf{E} - \tfrac{1}{2} E^2 \mathbf{I} \right)$$

جہاں ε ماحول کی اجازت، $\mathbf{E}$ برقی میدان، اور $\mathbf{I}$ شناخت ٹینسر ہے۔ پہلا ٹرم میدان لائنوں کے ساتھ سمت دباؤ کی نمائندگی کرتا ہے، اور دوسرا ٹرم میدان الگ ہونے کی مزاحمت کرنے والا آئسوٹروپک تناؤ۔

ایسے میدان میں غرق ایک جسم پر **خالص الیکٹرو میگنیٹک قوت** اس ٹینسر کا سطح انٹیگریل ہے:

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

فزیکل طور پر، یہ اظہار ہمیں بتاتا ہے کہ برقی میدان کسی بھی علاقے کی حدود پر تناؤ ڈالتا ہے جو چارج یا ڈائی الیکٹرک گرادیانٹس پر مشتمل ہو۔ لیکن الگ ہونے کی تھیورم کا استعمال کرتے ہوئے اسے زیادہ مقامی، حجم فارم میں دوبارہ لکھا جا سکتا ہے:

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \rho_e \mathbf{E} - \tfrac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon \quad .$$

پہلا ٹرم، $\rho_e \mathbf{E}$، واقف Coulomb **جسم قوت** ہے: ایک چارج کی کثافت ایک میدان کا تجربہ کر رہی ہے۔ دوسرا ٹرم صرف جہاں ماحول کی اجازت تیزی سے بدلتی ہے، جیسے مواد کی حدود پر، اہم ہے۔ ہوا میں، ε بنیادی طور پر یکساں ہے، لہذا $\nabla \varepsilon \approx 0$، چھوڑ کر

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

یہ دھوکہ دہی سے سادہ مساوات الیکٹرو ایئروڈائنامک پیش رفت کے پورے اصول کو کوڈ کرتی ہے۔ اگر گیس کا ایک حجم موجود ہے جس میں آئنز (کثافت ρ_e کے ساتھ) برقی میدان $\mathbf{E}$ کا تجربہ کرتے ہیں، تو ایک **خالص قوت کی کثافت** اس گیس پر کام کرتی ہے۔ کل دھکیل کی مقدار، ڈسچارج علاقے پر $\rho_e \mathbf{E}$ کی حجم انٹیگریل ہے:

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_e \mathbf{E} \, dV \text{ ۔}$$

الیکٹروڈز برابر اور مخالف رد عمل محسوس کرتے ہیں، دھکیل پیدا کرتے ہیں۔

لتی کی منتقلی اور ٹکراؤ کا کردار

ہوا میں آئنز نیوٹرل مالیکیولز سے ٹکرائے جانے سے پہلے شاذ و نادر ہی دور سفر کرتے ہیں۔ **اوسط فری راستہ** λ گیس دباؤ p اور کراس سیکشن σ کے الٹ تناسب میں ہے:

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

جہاں d مالیکیولر قطر ہے۔ سمندر کی سطح پر، λ چھوٹا ہے—دہائیوں نینو میٹر کی ترتیب کا۔ میسوسفیئر میں (تقریباً 70 کلومیٹر)، λ ملی میٹر یا سینٹی میٹر تک پھیل جاتا ہے۔

جب ایک آئن میدان کے تحت تیز ہوتا ہے، تو ٹکراؤ کے ذریعے نیوٹرلز کو گتی منتقل کرتا ہے۔ ہر ٹکراؤ آئن کی سمت گتی کا ایک حصہ شیئر کرتا ہے؛ تجمعی اثر ایک بڑے پیمانے پر **نیوٹرل بہاؤ** ہے—تجربہ کار آئنی ہوا کہتے ہیں۔ گیس ایمٹر سے کلیکٹر تک حرکت کرتی ہے، اور الیکٹروڈز مخالف رد عمل دھکیل کا تجربہ کرتے ہیں۔

بہت گاڑھی ہوا میں، آئنز بہت بار ٹکراتے ہیں؛ ان کی ڈریفٹ رفتار اشباع ہو جاتی ہے، اور توانائی گرمی کی شکل میں ضائع ہو جاتی ہے۔ انتہائی پتلی ہوا میں، ٹکراؤ بہت نایاب ہیں؛ آئنز آزادانہ اڑتے ہیں لیکن نیوٹرلز کو مؤثر طور پر کھینچتے نہیں۔ ان دو انتہاؤں

کے درمیان ایک **میٹھی جگہ** ہے جہاں اوسط فری راستہ موثر گتی کی منتقلی کی اجازت دیتا ہے — بالکل وہ علاقہ جہاں ہوائی جہاز خلائی طرف اپنا راستہ عبور کرتا ہے۔

تقریباً 10^{-2} سے 10^{-4} بار کے دباؤ پر (40–80 کلومیٹر بلندی کے مطابق)، آئنز ٹکراؤ سے پہلے میکروسکوپک فاصلوں پر تیز ہو سکتے ہیں، لیکن ٹکراؤ اب بھی دھکیل پیدا کرنے کے لیے کافی بار بار ہوتے ہیں۔ **الیکٹروایئروڈائنامک جوڑ** میدان اور گیس کے درمیان سب سے زیادہ سازگار ہے۔

طاقت–دھکیل تعلق

ایک ڈسچارج کو پہنچائی گئی برقی طاقت $P = \int_V \mathbf{J}\cdot\mathbf{E}\,dV$، جو مستقل کرنٹ I اور وولٹیج V کے لیے تقریباً IV ہے۔ مفید مکینیکل آؤٹ پٹ تیز ہوا کی ماس کی رفتار سے ضرب دھکیل، لیکن مستقل پیش رفت میں ہم بنیادی طور پر **دھکیل-کی-طاقت**، T/P، میں دلچسپی رکھتے ہیں۔

تجرباتی مطالعے T/P اقدار رپورٹ کر چکے ہیں جو کچھ ملی نیوٹن فی واٹ ($\mathrm{mN/W}$) سے لے کر optimize حالات میں تقریباً $0.1\ \mathrm{N/W}$ تک۔ معیاری دباؤ کی فضائی ہوا میں EAD غیر موثر ہے؛ لیکن کم دباؤ پر، آئن موبلٹی بڑھ جاتی ہے اور کرنٹ کی کثافت کم وولٹیج پر برقرار رکھی جا سکتی ہے، T/P بہتر بناتی ہے۔

ایک سادہ ڈائمینشنل دلیل جسم-قوت کی کثافت $f = \rho_e E$ کو کرنٹ کی کثافت $J = \rho_e \mu E$ سے جوڑتی ہے، جہاں μ آئن موبلٹی ہے۔ پھر

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

تو دی گئی کرنٹ کی کثافت کے لیے، زیادہ موبلٹی (کم دباؤ پر حاصل) کرنٹ فی زیادہ دھکیل دیتی ہے۔ کل برقی طاقت $P = JEV$ ہے، لہذا **دھکیل-کی-طاقت**

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

تناسب رکھتی ہے، جو کم برقی میدانوں یا زیادہ آئن موبلٹی کی کارکردگی بڑھانے کا اشارہ کرتی ہے۔ لیکن کم E کرنٹ اور لہذا کل دھکیل کو بھی کم کرتا ہے، تو دوبارہ ایک optimum regime ہے۔

یہ تعلقات نظریاتی تجسس نہیں ہیں — وہ ہر EAD ٹائل کے ڈیزائن کا تعین کرتے ہیں۔ دی گئی بلندی پر، وولٹیج، خلا کی فاصلہ، اور ایمٹر جیومیٹری **Paschen منحنی** (کہ بریک ڈاؤن وولٹیج کو دباؤ-فاصلہ کی ضرب سے جوڑتی ہے) کو مطمئن کرے لیکن تجاوز نہ کرے۔

ہوا کے لیے Paschen قانون تقریباً

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

بیان کیا جا سکتا ہے، جہاں A اور B تجرباتی مستقلات اور γ_{se} ثانوی الیکٹران اخراج کی ضریب ہے۔ ہوائی جہاز کی متغیر جیومیٹری، ماحولی دباؤ کے ساتھ چڑھائی کے دوران گرتے ہوئے، موثر corona ڈسچارج کو آرک بغیر برقرار رکھنے کے لیے الیکٹروڈ فاصلہ d کو متحرک طور پر ایڈجسٹ کرنے کی اجازت دیتی ہے۔

میدان جیومیٹری اور تناؤ ٹوپولوجی

ابتدائی "لفر" مظاہروں نے پتلی تار کو ایمٹر اور چپٹی فوائل کو کلیکٹر کے طور پر استعمال کیا۔ میدان لائنز شدید موڑدار تھیں، اور زیادہ تر توانائی کرونا کو برقرار رکھنے میں چلی گئی بجائے مفید دھکیل پیدا کرنے کے۔ کارکردگی خراب تھی کیونکہ **Maxwell تناؤ میدان** مطلوبہ دھکیل سمت سے ہم آہنگ نہیں تھا۔

کلیدی بصیرت — MIT آئن طیارہ سے پہلے نظریاتی کام میں تیار — برقی میدان کو ذیلی پیداوار نہیں بلکہ بنیادی ڈیزائن متغیر کے طور پر سمجھنا تھا۔ دھکیل، میدان لائنز کے ساتھ **الیکٹرو میگنیٹک تناؤ کا انٹیگریل** سے پیدا ہوتی ہے، لہذا مقصد ان لائنز کو وسیع علاقے میں متوازی اور مستقل بنانا ہے۔ تشبیہ ہوائی دھارا ہے: ہموار لیمینر بہاؤ مزاحمت کو کم سے کم کرتا ہے جیسے، ہموار الیکٹروسٹیٹک میدان ٹوپولوجی سمت تناؤ کو زیادہ سے زیادہ کرتا ہے۔

یہ "میدان ٹوپولوجی انجینئرنگ" آلہ کو پلازما کھلونا کی بجائے **الیکٹروسٹیٹک ایکٹیویٹر** کے طور پر دوبارہ فارم کرتا ہے۔ الیکٹروڈ موڑ، گارڈ پوٹینشلز، اور ڈائی الیکٹرک تہوں کو کنٹرول کرکے، $\mathbf{E}$ کو تیز ہونے کی پٹی پر تقریباً یکساں بنایا جا سکتا ہے، کوسائی-لینیر تناؤ پیدا کرتے ہوئے اور آرک کی وجہ بننے والے تباہ کن خود-فوکس سے بچتے ہوئے۔

نتیجہ پیمانہ کی قابلیت ہے۔ جب الیکٹروڈز کو مربع میٹر کیوڑوں میں ٹیسلیٹڈ کیا جاتا ہے، ہر ایک اپنے اعلیٰ وولٹیج کنورٹر اور کنٹرول لاجک کے ساتھ، پورا ہوائی جہاز کا لفافہ ایک عظیم الشان تقسیم شدہ EAD آرے میں تبدیل ہو سکتا ہے۔ ہم آہنگ کرنے کے

لیے کوئی حرکت پذیر حصہ نہیں، صرف میدانوں کو ہم آہنگ کرنے کے لیے۔

دھکیل کی کثافت اور پیمانہ کی قابلیت کی طرف راستہ

حجم جسم-قوت کی کثافت $\boldsymbol{f} = \rho_e \boldsymbol{E}$ ہے۔ فضائی دباؤ پر ایک عام کرونا ڈسچارج میں چارج کی کثافت 10^{-5} سے $10^{-3}\ \mathrm{C/m^3}$ کی ترتیب میں ہے۔ کم دباؤ پر، یہ کچھ کم ہو سکتی ہے، لیکن برقی میدان $\boldsymbol{E}$ کو بریک ڈاؤن کے بغیر دہائیوں کلو وولٹ فی سینٹی میٹر تک محفوظ طور پر بڑھایا جا سکتا ہے۔

اگر $\rho_e = 10^{-4}\ \mathrm{C/m^3}$ اور $E = 10^{5}\ \mathrm{V/m}$، تو قوت کی کثافت $f = 10\ \mathrm{N/m^3}$ ہے۔ 1 m موٹی فعال علاقے پر پھیلا، یہ سطحی دباؤ $10\ \mathrm{N/m^2}$ دیتا ہے — کچھ ملی پاسکال کے برابر۔ یہ چھوٹا لگ سکتا ہے، لیکن ہزاروں مربع میٹر پر یہ اہم ہو جاتا ہے۔ $10\ \mathrm{N/m^2}$ تناؤ کے ساتھ 1000 m² سطح 10,000 N دھکیل پیدا کرتی ہے، ملٹی-ٹن گاڑی کو ملی جی سطحوں پر تیز کرنے için کافی — بالکل ہفتہ لمبی مدار اٹھانے کے لیے درکار رژیم —۔

اس قسم کی تخمینیں بتاتی ہیں کہ EAD، اپنی کم طاقت کی کثافت کے باوجود، پتلی ہوا میں بڑے، **ہلکے ڈھانچوں** کے لیے کیوں قابل عمل ہو جاتا ہے۔ راکٹ نوزیڈ کی طرح، جو صرف اعلیٰ طاقت کی کثافت پر کارکردگی حاصل کرتا ہے، EAD رقبہ سے فائدہ اٹھاتا ہے۔ ہوائی جہاز کا لفافہ وافر رقبہ فراہم کرتا ہے؛ اسے فعال سطح میں تبدیل کرنا قدرتی مطابقت ہے۔

اوپری فضا کی میٹھی جگہ

ہر جسمانی نظام کا ایک آپریشنل niche ہوتا ہے۔ EADپیش رفت کے لیے، بہترین رژیم گیس دباؤ کا اتنا کم ہونا ہے کہ اعلیٰ وولٹیج اور لمبی آئن اوسط فری راستوں کی اجازت دے، لیکن اتنا کم نہ ہو کہ پلازما ٹکراؤ رہیت ہو۔

تقریباً 20 کلومیٹر کے نیچے، فضا بہت گاڑھی ہے: آئن موبلٹی کم، بریک ڈاؤن وولٹیج اعلیٰ، اور توانائی گیس کو گرم کرنے میں ضائع ہو جاتی ہے۔ تقریباً 100 کلومیٹر کے اوپر، ہوا بہت کم ہو جاتی ہے: آئونائزیشن مسلسل برقرار نہیں رکھی جا سکتی، اور نیوٹرل رد عمل کی ماس غائب ہو جاتی ہے۔ تقریباً 40 سے 80 کلومیٹر کے درمیان ایک **انتقالی بینڈ** — نچلی میسوسفیئر — ہے جہاں EADپیش رفت اپنی بہترین دھکیل-کی-طاقت تعلقات پیدا کر سکتی ہے۔

خوش قسمتی سے، یہ بھی وہ بلندی کی رینج ہے جہاں شمسی طاقت تقریباً بغیر کم ہونے والی رہتی ہے اور ہوائی مزاحمت سمندر کی سطح سے حکموں کی مقدار کم ہے۔ یہ ایک تنگ مگر معاف کرنے والی کھڑکی ہے، ایک نئی قسم کے گاڑی کے لیے قدرتی راہداری: نہ

طیارہ نہ راکٹ، بلکہ کچھ جو ان کے اوورلیپ میں رہتا ہے۔

کارکردگی اور توانائی کا بہاؤ

ہر لمحے، برقی ان پٹ P کے درمیان تقسیم ہوتا ہے:

1. **مفید مکینیکل دھکیل طاقت** $P_T = T v_{\text{eff}}$، جہاں v_{eff} ہوا کے بہاؤ کی موثر اخراج رفتار ہے۔
2. **آئونائزیشن نقصانات** P_i، پلازما کو برقرار رکھنے کے لیے درکار توانائی۔
3. **مزاحمتی نقصانات** P_r، اوہمی گرم کرنے اور لیکیج کی وجہ سے۔
4. **تابکاری نقصانات** P_γ، روشنی کی شکل میں خارج (جانی پہچان کرونا چمک) ۔

مجموعی کارکردگی $\eta = P_T / P$ ہے۔ تجربات تجویز کرتے ہیں کہ η گاڑھی ہوا میں چند فیصد اور optimize کم دباؤ آپریشن میں ممکنہ طور پر دہائیوں فیصد تک پہنچ سکتی ہے۔ حالانکہ معتدل، یہ اعداد و شمار طویل دورانیوں پر کام کرنے والے شمسی نظام کے لیے کافی ہیں، جہاں کارکردگی وقت کے بدلے میں تبدیل کی جا سکتی ہے۔

کیمیائی پیش رفت کی طرح، جو ایندھن کو کم کرنے کے لیے سیکنڈ فی اعلیٰ کارکردگی حاصل کرنا چاہیے، شمسی EAD ہوائی جہاز ناکارآمدی برداشت کر سکتا ہے اگر یہ **غیر محدود کام کر سکے**۔ کامیابی کا پیمانہ مخصوص آئینہ نہیں بلکہ **مخصوص صبر** ہے: دنوں پر جمع شدہ جوول۔

Maxwell تناؤ سے Macroscopic دھکیل تک

فیلڈ تھیوری اور روزمرہ تجربے کے درمیان رابطہ کو واضح کرنے کے لیے، خلا میں متوازی پلیٹ کپیسیٹر پر غور کریں۔ پلیٹوں کے درمیان دباؤ $p = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ ہے۔ اگر $E = 10^6\ \text{V/m}$، تو $p \approx 4.4\ \text{N/m}^2$۔ رقبہ سے ضرب دیں، اور آپ پلیٹوں کو الگ کرنے کے لیے درکار مکینیکل قوت حاصل کرتے ہیں۔ الیکٹروسٹیٹک تناؤ literally مکینیکل دباؤ ہے۔

EAD پیش رفت ایک پلیٹ کو فضا کے خود سے تبدیل کر دیتی ہے۔ آئنز وہ ماحول ہیں جن کے ذریعے میدان کا تناؤ منتقل ہوتا ہے۔ سٹیٹک دباؤ کی جگہ، ہم سمت بہاؤ حاصل کرتے ہیں۔ مساوات $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$، اس سٹیٹک کپیسیٹر دباؤ کا متحرک مشابہ ہے۔

ہوائی جہاز کی سطح پر جمع کی جائے تو، انٹیگریٹڈ تناؤ ایک خالص دھکیل ویکٹر بن جاتا ہے، بالکل ایک ونگ کی سطح پر انٹیگریٹڈ دباؤ اٹھانا پیدا کرتا ہے۔ مشابہت گہری ہے: ہوائی دھارا اٹھانا سطح سے منحرف ہوا کا گتی کا بہاؤ ہے؛ EAD دھکیل میدان سے تیز آئنز کا گتی کا بہاؤ ہے۔

MIT آئن طیارہ اور تجرباتی ثبوت

عقود کے لیے، شک کار EAD کو لیبارٹری تجسس کے طور پر مسترد کرتے رہے۔ پھر، 2018 میں، MIT کی طرف سے بنایا گیا ایک چھوٹا فکسڈ ونگ طیارہ صرف الیکٹروایئروڈائنامک دھکیل سے **مستحکم، پرو پیلر بغیر اڑنا دکھایا۔** "آئن طیارہ" تقریباً 2.5 کلو گرام وزن کا تھا اور بیٹری طاقت کے تحت دہائیوں میٹر اڑا۔ اس کا دھکیل-کی-وزن تناسب چھوٹا تھا، لیکن کامیابی تاریخی: ہوا سے بھاری پہلا گاڑی جو آئنی پیش رفت سے اڑنے میں برقرار رکھی گئی۔

حاسم طور پر، اس مظاہرے کی طرف لے جانے والی تھیوری اور تصوراتی کام پہلے سے ہی آزاد طور پر ترقی پذیر تھا۔ **الیکٹروایئروڈائنامک پیش رفت** میں پیش کردہ نظریاتی فریم ورک **Maxwell** تناؤ اور **Coulomb جسم قوت** کے الفاظ میں وہی میکانزم بیان کر چکا تھا برسوں پہلے، کرونا کیمسٹری کی بجائے میدان ٹوپولوجی اور پیمانہ کی قابلیت پر زور دیتے ہوئے۔

MIT آئن طیارہ نے گاڑھی ہوا میں اثر کی عملی قابلیت ثابت کی۔ Rise–Fly–Orbit منصوبہ اسے پتلی ہوا میں وسعت دینے کا ہدف رکھتا ہے، جہاں فزکس اور بھی سازگار ہو جاتی ہے۔ اگر ایک چھوٹا طیارہ 1 بار پر اڑ سکتا ہے، تو ایک شمسی ہوائی جہاز مائیکروبار پر مدار تک اڑ سکتا ہے، مناسب صبر اور سورج کی روشنی دی گئی۔

سادگی کی فضیلت

EADپیش رفت تصوراتی طور پر خوبصورت ہے: حرکت پذیر حصوں کے بغیر، جلنے کے بغیر، اعلیٰ رفتار اخراج کے بغیر، کریوجینک کے بغیر۔ اس کے اجزاء فطری طور پر مضبوط ہیں — الیکٹروڈز، ڈائی الیکٹرک، پاور کنورٹرز، اور فوٹو وولٹک جلدیں۔ نظام رقبہ کے ساتھ، کثافت کے ساتھ نہیں، قدرتی طور پر پیمانہ کرتا ہے۔

تکنیکی چیلنج تھرموڈائنامکس سے **برقی انجینئرنگ اور مواد سائنس** کی طرف منتقل ہوتا ہے: کرونا کٹاؤ روکنا، چارج لیکیج کا انتظام، اور مختلف دباؤ میں اعلیٰ وولٹیج تنہائی برقرار رکھنا۔ یہ جدید مواد اور مائیکرو الیکٹرانکس کے ساتھ حل شدہ ہیں۔

EAD میکانزم صرف میدان جیومیٹری اور آئن موبلٹی پر منحصر ہونے کی وجہ سے، **فطری طور پر ماڈیولر** ہے۔ ہوائی جہاز کی جلد کا ہر مربع میٹر T/P اور وولٹیج خصوصیات کے ساتھ معلوم ایک ٹائل کے طور پر علاج کیا جا سکتا ہے۔ گاڑی کی کل دھکیل ہزاروں آزاد ٹائلز کا ویکٹر مجموعہ ہے۔ یہ ماڈیولریٹی خوبصورت گراوٹ کی اجازت دیتی ہے — کچھ ماڈیولز کی ناکامی پورے آلے کو خطرے میں نہیں ڈالتی۔

الیکٹرو ایئروڈائنامک ہوائی جہاز ایک نظام کے طور پر

شمسی توانائی سے جڑنے پر، EAD پیش رفت نہ صرف دھکیل کا ذریعہ بنتی ہے بلکہ گاڑی کے لیے ایک **موسمی نظام** بھی بن جاتی ہے۔ وہی میدان جو دھکیل پیدا کرتے ہیں، ٹریس گیسوں کو بھی آئنز کرتے ہیں، سطحی چارج کم کرتے ہیں، اور ممکنہ طور پر سرحد کی تہہ کی خصوصیات کو متاثر کرتے ہیں۔ برقی میدان یہاں تک کہ زمین کے مقناطیسی میدان یا اوپری فضا میں ماحول پلازما کے ساتھ کمزور تعامل کرنے والی ایڈجسٹ ایبل "الیکٹروسٹیٹک سیل" کے طور پر خدمت کر سکتا ہے۔

لمبے عرصے میں، سطحی چارج کی تقسیموں کو ہیرا پھیری کرکے مزاحمت کی فعال کنٹرول کی تصور کی جا سکتی ہے — ایک **الیکٹروڈائنامک مزاحمت ڈھال** جو مقامی میدان تناؤ کو تبدیل کرتا ہے تاکہ مکینیکل کنٹرول سطحوں کے بغیر اڑنے کا راستہ ٹرم کیا جائے۔

یہ امکانات EAD پیش رفت کو ایک تجسس سے آگے، گیسوں یا پلازما کے برقی میدانوں سے قطبیز اور تیز کی جا سکیں جہاں بھی عمومی مقصد، ٹھوس حالت اڑنے کنٹرول ٹیکنالوجی کے علاقے میں لے جاتے ہیں۔

انجینئرنگ آرکیٹیکچر اور اڑنے کی ڈائنامکس

Rise–Fly–Orbit تصور کی بنیادی برتری عجیب مواد یا انقلابی فزکس میں نہیں بلکہ **معروف اصولوں کی دوبارہ ترتیب** میں ہے۔ تیراکی، شمسی توانائی، اور الیکٹروسٹیٹکس سب اچھی طرح سمجھے جاتے ہیں۔ نیا ان کو ایک ہی تسلسل میں ترتیب دینا ہے: **بغیر وقفے کے لمحے کا اُٹھنا**۔

راکٹس مختلف رژیموں سے گزرتے ہیں — لانچ، برن آؤٹ، کوسٹ، مدار۔ الیکٹرو ایئروڈائنامک ہوائی جہاز، اس کے برعکس، صرف تدریجی منتقلیوں کا تجربہ کرتا ہے۔ ہلکے پن سے اُٹھتا ہے، اٹھانے سے اڑتا ہے، اور سستی سے مدار میں داخل ہوتا ہے۔ ہر مرحلہ اگلے میں مل جاتا ہے، تیراکی، ہوائی دھارا، اور الیکٹروسٹیٹک قوتوں کی ایک ہی مستحکم تعامل سے چلایا جاتا ہے۔

لفافہ: ڈھانچہ بطور فضا

ہوائی جہاز کا لفافہ متضاد تقاضوں کو پورا کرنا چاہیے: یہ **ہلکا** اور **مضبوط** دونوں ہونا چاہیے، **چالک** اور تنہا، **سورج کی روشنی کے لیے شفاف** مگر **تابکاری کے لیے مزاحم**۔ یہ تہہ دار تعمیر کے ذریعے ہم آہنگ کی جا سکتے ہیں۔

باہری تہہ **میٹلائزڈ پولیمر** ہو سکتی ہے — مثلاً، المینیوم کورٹڈ کیپٹن یا پولی ایتھیلین ٹیرفیتھالیٹ کی پتلی فلم۔ یہ تہہ UV شیلڈنگ فراہم کرتی ہے اور EAD ٹائلز کے لیے جزوی الیکٹروڈ سطح کے طور پر کام کرتی ہے۔ اس کے نیچے ایک **ڈائی الیکٹرک تہہ** ہے جو ناپسندیدہ ڈسچارج روکتی ہے اور اندرونی کلیکٹر الیکٹروڈ کے لیے خلا کو بیان کرتی ہے۔ اندرونی ڈھانچہ تناؤ شدہ میمبرین اور بیموں کا ایک نیٹ ورک ہے جو مجموعی جیومیٹری کو چھوٹے اندرونی اوور پریشر پر برقرار رکھتا ہے، $\Delta p \approx 300\ \text{Pa}$ کی ترتیب کا — صرف فضائی دباؤ کے چند ہزارویں۔

یہ اوور پریشر لفافہ کو تناؤ میں رکھنے کے لیے کافی ہے لیکن اہم ساختاتی ماس پیدا کرنے کے لیے نہیں۔ حقیقت میں، پورا گاڑی ایک بہت بڑا، ہلکا کپیسیٹر ہے، اس کی جلد چارج شدہ اور میدان لائنز سے زندہ۔

اندرونی حجم اٹھانے والا گیس — ہائیڈروجن یا ہیلیم — سے بھرا ہے۔ مطلوبہ اوور پریشر چھوٹا ہونے کی وجہ سے، مواد پر لوڈ برداشت تقاضے معتدل ہیں۔ مرکزی چیلنج لمبے مشنوں پر گیس کی نفوذپذیری اور UV گراوٹ ہے، دونوں جدید کوٹنگز اور تہہ دار فلموں سے قابل حل۔

ہائیڈروجن یا ہیلیم

گیس کا انتخاب گاڑی کی شخصیت کو تشکیل دیتا ہے۔

ہائیڈروجن سب سے زیادہ اٹھانا دیتا ہے، ہیلیم سے تقریباً 10% زیادہ تیراکی۔ جب کل حجم لاکھوں کیوبک میٹر تک پہنچ جائے تو یہ فرق اہم ہو جاتا ہے۔ ہائیڈروجن حاصل کرنے میں بھی آسان ہے اور یہاں تک کہ شمسی توانائی والی پانی کی الیکٹرولیسس سے ان سٹو پیدا کیا جا سکتا ہے۔ اس کا نقصان، البتہ، جلن ہے۔

اعلیٰ وولٹیج الیکٹروسٹیٹکس کی موجودگی ہائیڈروجن انتظام کو غیر معمولی بناتی ہے۔ حفاظت احتیاط بھری تقسیم، الیکٹروسٹیٹک شیلڈنگ، اور وینٹیلیشن پر منحصر ہے۔ EAD ماڈیولز خود سیل شدہ ہیں اور ڈائی الیکٹرک رکاوٹوں سے گیس سیلز سے الگ ہیں، اور شیل پر ممکنہ فرق سمٹرک چارج کی تقسیم سے کم از کم کیے جاتے ہیں۔

ہیلیم، اس کے برعکس، غیر فعال اور محفوظ ہے لیکن کم اٹھانا اور زیادہ لاگت دیتا ہے۔ اس کا مرکزی نقصان کمی ہے؛ بڑے پیمانے پر استعمال سپلائی کو دباؤ دے سکتا ہے۔ ابتدائی ٹیسٹ گاڑیوں اور عوامی مظاہرہ پروازوں کے لیے، ہیلیم دانش مند انتخاب ہے۔ دور دراز راہداریوں میں آپریشنل مدار کوششوں کے لیے، ہائیڈروجن کارکردگی اور لاگت سے جائز ہو سکتی ہے۔

بہرحال، لفافہ ڈیزائن بڑے پیمانے پر مطابقت رکھتا ہے؛ صرف گیس ہینڈلنگ اور حفاظتی سسٹم مختلف ہیں۔

شمسی توانائی اور توانائی انتظام

سورج گاڑی کا انجن ہے۔ ہر واٹ برقی توانائی فوٹو وولٹک جلد سے جذب ہونے والی شمسی روشنی سے شروع ہوتا ہے۔

اعلیٰ کارکردگی الٹرا ہلکے فوٹو وولٹکس — گالیم آرسینیڈ پتلی فلم یا پیروسکائٹ کمپوزیٹس ہوائی جہاز کی سطح پر لیمینیٹ — **300–400 W/kg** تک مخصوص طاقتیں حاصل کر سکتے ہیں۔ آرے aerodinamik ہموار پن برقرار رکھنے کے لیے ہم آہنگ ترتیب دیے گئے ہیں۔ توانائی انتظام تقسیم شدہ ہے: ہر پینل سیکشن ایک مقامی زیادہ سے زیادہ طاقت پوائنٹ ٹریکر (MPPT) کو کھلاتا ہے جو EAD ٹائلز کو سپلائی کرنے والے اعلیٰ وولٹیج بس وولٹیج کو ریگولیٹ کرتا ہے۔

گاڑی دن رات سائیکلز کا تجربہ کرتی ہے، لہذا ایک معتدل **توانائی بافر** — ہلکی بیٹریاں یا سوپر کیپیسٹرز — لے جاتی ہے، تاریکی میں کم سطح آپریشن کو برقرار رکھنے کے لیے۔ لیکن یہ بڑے نہیں ہیں؛ نظام کا ڈیزائن فلسفہ **براہ راست شمسی** ڈرائیو ہے، ذخیرہ شدہ توانائی نہیں۔ مدار کی بلندیوں پر، گاڑی تقریباً مسلسل سورج کی روشنی کا تعاقب کر سکتی ہے، eclipse میں صرف مختصر ڈپ۔

حرارتی کنٹرول تابکاری طور پر ہینڈل کیا جاتا ہے۔ اعلیٰ بلندی پر ناقابل ذکر کنویکشن کے ساتھ، حرارت کی رد **اعلیٰ اخراجیت سطحوں** اور ریڈی ایٹرز کی طرف رہنمائی راستوں پر منحصر ہے۔ خوش قسمتی سے، EAD عمل نسبتاً ٹھنڈا ہے — جلنا نہیں — اور مرکزی حرارتی لوڈ جذب شدہ سورج کی روشنی ہے۔

الیکٹرو ایئروڈائنامک ٹائلز

لفافہ کا ہر مربع میٹر ایک **EAD ٹائل** کے طور پر کام کرتا ہے — ایک ایمٹر، ایک کلیکٹر، اور ایک چھوٹا کنٹرول سرکٹ پر مشتمل خود لفیل پیش رفت سیل۔ ایمٹر تیز نوکوں یا تاروں کا ایک باریک گرڈ اعلیٰ مثبت پوٹینشل پر ہو سکتا ہے، جبکہ کلیکٹر زمین کے قریب یا منفی پوٹینشل پر رکھا گیا ایک وسیع جال ہے۔ درمیان ایک کنٹرولڈ ڈسچارج علاقہ ہے۔

توانائی دار ہونے پر، ٹائل ایک برقی میدان $\boldsymbol{E}$ قائم کرتا ہے، ایک چارج کی کثافت ρ_e پیدا کرتا ہے، اور سطح کے ساتھ مماس سمت میں ایک مقامی دھکیل $\boldsymbol{f} = \rho_e \boldsymbol{E}$ پیدا کرتا ہے۔ مختلف ٹائلز پر وولٹیج کو ماڈولیٹ کرکے، ہوائی جہاز حرکت پذیر حصوں کے بغیر سٹیئر، پیچ اور رول کر سکتا ہے۔

ایڈاپٹو جیومیٹری کلید ہے۔ ماحولی دباؤ بلندی کے ساتھ گرتے ہوئے، اوسط فری راستہ بڑھ جاتا ہے۔ موثر ڈسچارج برقرار رکھنے کے لیے، ایمٹر اور کلیکٹر کے درمیان موثر خلا کی فاصلہ d تقریباً $1/p$ کے تناسب میں بڑھنا چاہیے۔ یہ، بیرونی دباؤ گرتے ہوئے ہلکے پھیلنے والے **لچکدار، پھلنے والے ڈائی الیکٹرک فاصلہ رکھنے والے** کے ساتھ، یا **الیکٹرانک ماڈولیشن** کے ساتھ پوٹینشل گرادیانٹس کو بڑے خلوں کی نقل کرنے کے لیے، حاصل کیا جا سکتا ہے۔

ہر ٹائل ٹیلی میٹری — کرنٹ، وولٹیج، آرک کاؤنٹرز — مرکزی کنٹرولر کو رپورٹ کرتا ہے۔ ایک ٹائل آرک یا گراوٹ کا تجربہ کرے تو، بند کر دیا جاتا ہے اور بائی پاس کیا جاتا ہے۔ ماڈیولر ڈیزائن کا مطلب ہے کہ انفرادی ٹائلز کا نقصان کل دھکیل کو مشکل سے متاثر کرتا ہے۔

تیراکی سے دھکیل تک

اڑنا آہستہ شروع ہوتا ہے۔ لانچ پر، ہوائی جہاز تیراکی سے سٹریٹوسفیئر میں اُٹھتا ہے۔ چڑھائی کے دوران، EAD نظام کم طاقت موڈ میں کام کرتا ہے، استحکام اور ڈریفٹ کنٹرول کے لیے معمولی دھکیل فراہم کرتا ہے۔

تقریباً 30–40 کلومیٹر بلندی پر، جہاں ہوا پتلی مگر اب بھی ٹکراؤ والی ہے، مرکزی تیز ہونے شروع ہوتا ہے۔ ہوائی جہاز آہستہ آہستہ افقی اڑنے کی طرف گھومتا ہے، اپنا لمبا محور مطلوبہ مدار حرکت کی سمت میں سمت دیتا ہے۔

ابتدائی طور پر، دھکیل افقی تیز ہونے اور اٹھانا بڑھانے کے درمیان متوازن ہے۔ گاڑی کا باقی تیراکی اس کے وزن کا بڑا حصہ تلافی کرتا ہے؛ EAD دھکیل دونوں آگے اور قدرے اوپر کی اجزاء فراہم کرتا ہے۔ جیسے رفتار بڑھتی ہے، متحرک اٹھانا بڑھتا ہے اور تیراکی ناقابل ذکر ہو جاتی ہے۔ منتقلی ہموار ہے — "ٹیک آف لمحہ" نہیں کیونکہ ہوائی جہاز کبھی رن وے پر بیٹھا ہی نہیں تھا۔

تین ہفتہ کی چڑھائی

ایک نمائندہ گاڑی کی ماس $m = 2000\ \text{kg}$ پر غور کریں۔ $t = 1.8 \times 10^6\ \text{s}$ (تین ہفتہ) میں $v = 7.8 \times 10^3\ \text{m/s}$ مدار رفتار حاصل کرنے کے لیے، مطلوبہ اوسط دھکیل

$$T = m\frac{v}{t} = 2000 \times \frac{7.8\times10^{3}}{1.8\times10^{6}} \approx 8.7\ \text{N}.$$

آٹھ نیوٹن — ایک چھوٹے نارنگی کا وزن — تین ہفتہ مسلسل لگائے جانے پر مدار تک پہنچنے کے لیے کل دھکیل درکار ہے۔

اگر نظام کا T/P $0.03\ \text{N/W}$ ہے، کم دباؤ پر موثر EAD آپریشن کی علامتی، تو 8.7 N پیدا کرنے کے لیے صرف تقریباً **290 W** طاقت درکار ہے۔ یہ حیرت انگیز طور پر چھوٹا لگتا ہے، اور عملی طور پر، اضافی مزاحمت نقصانات ضرورت کو دہائیوں کلوواٹ تک بڑھا دیں گے۔ لیکن چند سو مربع میٹر کو ڈھانپنے والے شمسی پینل اسے آسانی سے فراہم کر سکتے ہیں۔

غیر موثر اور مزاحمت کے لیے 100 کا حفاظتی عنصر شامل کریں: تقریباً **30 kW** برقی طاقت۔ شمسی روشنی سے دھکیل تک 15% مجموعی کارکردگی کے ساتھ، گاڑی کو تقریباً **200 kW شمسی طاقت** حاصل کرنا چاہیے۔ 300 W/m² آؤٹ پٹ پر تقریباً 700 مربع میٹر فعال شمسی علاقہ — فٹ بال فیلڈ سے چھوٹا علاقہ، 100 میٹر لمبے ہوائی جہاز پر آسانی سے ضم شدہ۔

یہ سادہ حساب بتاتا ہے کہ **توانائی کا بہاؤ معقول** ہے۔ راکٹس جو طاقت کی کثافت سے حاصل کرتے ہیں، ہوائی جہاز صبر اور علاقہ سے حاصل کرتا ہے۔

مزاحمت اور اعلیٰ بلندی راہداری

مزاحمت مرکزی توانائی نگلنے والا رہتا ہے۔ مزاحمت قوت $F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_D$، متعلقہ طاقت $P_D = F_D v = \frac{1}{2}\rho v^3 A C_D$۔

50 کلومیٹر پر $\rho \approx 10^{-3}\ \text{kg/m}^3$۔ اگر $A = 100\ \text{m}^2$، $C_D = 0.05$، اور $v = 1000\ \text{m/s}$، تو

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

یہ 2.5 میگاواٹ ہے — بہت زیادہ۔ 70 کلومیٹر پر $\rho = 10^{-5}\ \text{kg/m}^3$، وہی ترتیب صرف 25 kW مزاحمت طاقت پیدا کرتی ہے۔ اس لیے حکمت عملی: **تیز ہوتے ہوئے چڑھو**، ρv^3 تقریباً مستقل رہنے والی راہداری پر رہو۔

ایڈیل راہداری آہستہ آہستہ پتلی ہونے والی ہوا کی، شاید 40–80 کلومیٹر بلندی، جہاں فضا EAD کام کرنے کے لیے کافی نیوٹرل لثافت فراہم کرتی ہے لیکن مزاحمت کو قابل انتظام رکھنے کے لیے کافی کم۔

گاڑی کنٹرول اور استحکام

پروانہ یا پنکھوں کے بغیر، استحکام میدان کی ہم آہنگی سے آتا ہے۔ مختلف فعال کاری ٹائلز ٹارک فراہم کرتے ہیں۔ اگر بائیں سامنے ٹائلز دائیں سے تھوڑا زیادہ دھکیل پیدا کریں، تو گاڑی آہستہ yaw کرتی ہے۔ پچ کنٹرول اوپر اور نیچے ٹائلز کو بایس کر کے حاصل ہوتا ہے۔ ٹائل فی دھکیل چھوٹی ہونے کی وجہ سے جواب سست ہے، لیکن گاڑی ایک ایسے رژیم میں کام کرتی ہے جہاں چست ہونا غیر ضروری ہے۔

رویہ سینسرز — جائروسکوپ، ایکسلریومیٹر، ستارہ ٹریکرز — ڈیجیٹل کنٹرول سسٹم کو کھلاتے ہیں جو زیادہ سے زیادہ شمسی واقع اور درست اڑنے کی راہ کی سمت برقرار رکھتا ہے۔ گاڑی کا وسیع حجم اور سست اڑنے کا رژیم اسے نمایاں طور پر مستحکم بناتا ہے۔

حرارتی اور برقی حفاظت

EAD آپریشن کم کرنٹ میں دہائیوں سے صدیوں کلو وولٹ شامل ہے۔ سٹریٹوسفیئر کی پتلی، خشک ہوا میں، تنہائی مختلف برتاؤ کرتی ہے: آرکس سطحوں پر لمبی فاصلیں پھیل سکتی ہیں۔ ہوائی جہاز کا برقی ڈیزائن اس طرح پوری ساخت کو ایک کنٹرولڈ پوٹینشل سسٹم کے طور پر سمجھتا ہے۔ چالک راستے اضافی ہیں، گیس سیلز کو HV لائنوں سے الگ کرنے والی ڈائی الیکٹرک تنہائی تہوں کے ساتھ۔

آرک تباہ کن نہیں — مقامی اور خود بجھنے والے ہونے کا رجحان — لیکن الیکٹروڈز کو نقصان پہنچا سکتے ہیں۔ ہر ٹائل اپنی کرنٹ ویو فارم کی نگرانی کرتا ہے؛ ایک ڈسچارج اسپائیک پر، کنٹرولر وولٹیج کم کرتا ہے یا متاثرہ ماڈیول کو کئی سیکنڈ کے لیے سوئچ آف کرتا ہے۔

حرارتی طور پر، کنویکشن کی عدم موجودگی کا مطلب ہے کہ کوئی بھی مقامی گرم ہونے کو رہنمائی سے تابکاری پینلز تک پھیلایا جائے۔ مواد اعلیٰ اخراجیت اور انفراریڈ میں کم جذب کے لیے منتخب کیے جاتے ہیں، زیادہ حرارت کو خلائی میں تابکاری کرنے کی اجازت دیتے ہیں۔

پیمانہ کی قابلیت اور ماڈیولریٹی

سسٹم ٹیسلیشن کے ذریعے پیمانہ ہوتا ہے، وولٹیج بڑھانے سے نہیں۔ ٹائلز کی تعداد دگنی کرنے سے دھکیل دگنی ہو جاتی ہے؛ بڑے ڈسچارجز کی ضرورت نہیں ہے۔ یہ آرکیٹیکچر کو لینیر **پیمانہ کی قابلیت** بناتا ہے، لیبارٹری ماڈلز سے مدار گاڑیوں تک۔

ایک عملی پروٹوٹائپ ایک چھوٹے، ہیلیم بھرے پلیٹ فارم سے شروع ہو سکتا ہے جس میں دہائیوں مربع میٹر EAD سطح ہے، ہفتوں پر ماپے گئے ملی نیوٹن دھکیل پیدا کرتا ہے۔ بڑے مظاہرے پیروی کر سکتے ہیں، ہر ایک رقبہ اور طاقت میں پھیلا ہوا۔ حتمی مدار ورژن سینکڑوں میٹر پھیل سکتا ہے، ہزاروں آزاد کنٹرول شدہ ٹائلز کے ساتھ، مکمل شمسی طاقت کے تحت مہینوں تک کام کرتا ہے۔

تمام اجزاء ٹھوس حالت ہونے کی وجہ سے، سسٹم کی ایک اندرونی لمبی سروس لائف ہے۔ ٹربائن بیرنگز یا جلنے کے سائیکلز پہننے کے لیے نہیں — صرف تدریجی الیکٹروڈ کیڑا اور مواد کی عمر۔ احتیاط سے ڈیزائن کے ساتھ، اوسط وقت ناکامیوں کے درمیان برسوں تک پہنچ سکتا ہے۔

چڑھائی پروفائلز اور بلندی منتقلیاں

مکمل مشن (v, ρ) طیب میں ایک ہموار مارپیچ کے طور پر تصور کیا جا سکتا ہے: رفتار بڑھنے کے ساتھ، کثافت کم ہوتی ہے۔ راستہ منتخب کیا جاتا ہے تاکہ ρv^3 — جو مزاحمت طاقت کا تعین کرتا ہے — شمسی سسٹم کی فراہم کرنے کی قابلیت کی حد سے نیچے رہے۔

1. **تیرا کی چڑھائی** 30–40 کلومیٹر تک۔
2. **تیز ہونے کی مرحلہ**: پیچ اور بلندی کو ایڈجسٹ کر کے تقریباً $P_D \approx 20\text{–}50\ \text{kW}$ برقرار رکھیں۔
3. **مدار رژیم کی منتقلی**: 70 کلومیٹر سے اوپر، اٹھانا اور تیرا کی غائب ہو جاتے ہیں، اور ہوائی جہاز مؤثر طور پر ایک سیٹلائٹ بن جاتا ہے جو اب بھی فضا کو کھرچتا ہے۔

"اڑنا" سے "مدار" کی منتقلی ایک تیز حد نہیں ہے۔ فضا آہستہ آہستہ محو ہو جاتی ہے؛ دھکیل مزاحمت کی تلافی کرتی ہے جب تک مزاحمت اہمیت نہ رکھے۔ گاڑی کا راستہ بالسٹک کی بجائے دائرہ وار ہو جاتا ہے، اور یہ فضا میں غیر محدود رہتا ہے۔

توانائی توازن اور برداشت

پورے چڑھائی پر انٹیگریٹ، سورج سے کل توانائی ان پٹ درکار سے وسیع ہے۔ 100 kW معتدل اکٹھا کرنے والی شرح پر بھی، تین ہفتہ مسلسل آپریشن جمع کرتا ہے

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

2000 kg گاڑی کے لیے **90 MJ/kg** — مدار kinetik توانائی کی ضرورت کا تین گنا۔ اس توانائی کا زیادہ تر حصہ مزاحمت اور ناکارآمدیوں میں ضائع ہو جائے گا، لیکن مارجن سخاوت مندانہ ہے۔

یہ شمسی صبر کا خاموش جادو ہے: جب وقت کو پھیلانے کی اجازت دی جائے، تو توانائی کی وافر پن طاقت کی کمی کی جگہ لے لیتا ہے۔

بحالی، واپسی، اور دوبارہ استعمال

اپنی مدار مشن مکمل کرنے کے بعد، ہوائی جہاز اپنے EAD میدان کی قطبیت کو الٹ کر تدریجی طور پر سست ہو سکتا ہے۔ نیچے اترتے ہوئے مزاحمت بڑھ جاتی ہے؛ اسے اٹھانے والا ہی میکانزم اب بریک کی طرح کام کرتا ہے۔ گاڑی باقی تیراکی کے تحت سٹریٹوسفیئر میں دوبارہ داخل ہو سکتی ہے اور نیچے تیر سکتی ہے۔

کوئی خرچ ہونے والی مرحلہ پھینک دیا جاتا ہے، لہذا نظام **مکمل طور پر دوبارہ استعمال کے قابل** ہے۔ لفافہ سروس کیا جا سکتا ہے، دوبارہ گیس بھرا جا سکتا ہے، اور دوبارہ لانچ کیا جا سکتا ہے۔ بحالی میں خراب ٹائلز یا فلموں کو تبدیل کرنا شامل ہے نہ کہ انجنوں کو دوبارہ تعمیر کرنا۔

کیمیائی راکٹس کے برعکس، جہاں ہر لانچ ٹینک اور ایندھن کھپت کرتا ہے، EAD ہوائی جہاز ایک **توانائی دوبارہ ری سائیکلنگ خلائی جہاز** ہے۔ سورج اسے مسلسل دوبارہ بھرتی ہے؛ صرف پہناؤ اور پھٹاؤ انسانی مداخلت درکار ہے۔

وسیع تر انجینئرنگ اہمیت

ایک شمسی EAD ہوائی جہاز کو ممکن بنانے والی ایک ہی ٹیکنالوجیز — ہلکی فوٹو وولٹکس، اعلیٰ وولٹیج پاور الیکٹرانکس، پتلی فلم ڈائی الیکٹرک — فوری زمینی ایپلی کیشنز ہیں۔ سٹریٹوسفیئرک کمیونیکیشن پلیٹ فارمز، اعلیٰ بلندی کی موسمی سینسرز، اور طویل مدتی ڈرونز سب ایک ہی پیشرفتوں سے فائدہ اٹھاتے ہیں۔

ایک ایندھن بغیر مدار تک پہنچنے والے سسٹم کا پیچھا کرتے ہوئے، ہم ایک نئی کلاس کے **ٹھوس حالت ہوائی گاڑیوں** کا بھی اختراع کرتے ہیں — مشینیں جو جلنے سے نہیں بلکہ میدان ہیرا پھیری سے اڑتی ہیں۔

اس معنی میں، Rise–Fly–Orbit پروجیکٹ Wright Flyer اور پہلے مائع ایندھن راکٹس کی ایک نسل میں بیٹھتا ہے: نہ ایک کامل ٹیکنالوجی، بلکہ ایک **اصول کا ثبوت** جو "اڑنا" کا مطلب تبدیل کر دیتا ہے۔

ضابطہ سازی، حکمت عملی، اور آہستہ اُٹھنے کی فلسفہ

ایک شمسی الیکٹرو ایئروڈائنامک ہوائی جہاز کی فزکس اجازت دینے والی ہے؛ قانون نہیں ہے۔ آج کی اڑنے کی قواعد آسمان کو صاف طور پر محدود علاقوں میں تقسیم کرتی ہیں: **ہوا کا علاقہ** ہوائی قانون سے چلایا جاتا ہے، اور **باہر کی فضا** خلائی قانون سے چلایا جاتا ہے۔ ان کے درمیان ایک سرمئی علاقہ ہے — طیارہ سرٹیفیکیشن کے لیے بہت زیادہ، مدار رجسٹریشن کے لیے بہت کم — ہے۔ مدار کی طرف ہوائی جہاز بالکل اس سرمئی میں رہتا ہے، جو کاغذ پر کسی بھی زمرہ سے تعلق نہیں رکھتی بلندیوں سے مسلسل گزرتا ہے۔

کیوں "ناممکن"

ہوا علاقہ تدوین گھنٹوں میں اڑان اور لینڈنگ کرنے والے گاڑیوں کو فرض کرتی ہیں۔ وہ سرٹیفائیڈ انجن، ہوائی دھارا کنٹرول سطحیں، اور ٹریفک چھوڑنے کی صلاحیت درکار کرتی ہیں۔ ان میں سے کوئی بھی فرضیہ ایک خود مختار، شمسی چلنے والے غبارہ سے جو 60 کلومیٹر سے اوپر ہفتوں تک رہ سکتا ہے، مطابقت نہیں رکھتا۔

لانچ گاڑی ضابطے راکٹس فائرنگ جہاں سے شروع ہوتے ہیں: ایک الگ اشتعال، لانچ سائٹ، اور ایک فلائٹ ٹرمینیٹ سسٹم جو دھماکوں کو شامل کرنے کے لیے ڈیزائن کیا گیا ہے۔ ہمارا ہوائی جہاز ان میں سے کوئی نہیں رکھتا۔ یہ بادل کی طرح آہستہ اُٹھتا ہے؛ کوئی "لانچ لمحہ" نہیں ہے۔ تاہم، کیونکہ یہ بالآخر Mach 1 سے تجاوز کر جائے گا اور مدار کی رفتار حاصل کر لے گا، یہ خلائی پرواز کی دائرہ اختیار کے تحت آتا ہے۔ نتیجہ متضاد ہے: یہ قانونی طور پر طیارہ کی طرح اڑ نہیں سکتا، لیکن اس راکٹ کی طرح جو اس سے ملتا جلتا نہیں ہے، لائسنس لینا چاہیے۔

ایک ہائبرڈ فضائی–مدار گاڑی کی کلاس

علاج ایک نئی زمرہ تسلیم کرنا ہے — **ایک ہائبرڈ فضائی–مدار گاڑی (HAOV)** ۔ اس کی تعریف شدہ خصوصیات ہوں گی:

- **مستقل علاقہ عبور:** سطح سے قریب خلائی تک چڑھائی بغیر الگ مرحلوں کے۔
- **کم kinetik توانائی کا بہاؤ:** فضا کے ساتھ کل گتی کا تبادلہ راکٹس سے بہت زیادہ حکموں کی مقدار کم۔
- **غیر فعال ناکامی محفوظ سلوک:** طاقت کی کمی پر، گاڑی بہتی اور اترتی ہے؛ یہ بالسٹک طور پر نہیں گرتی۔

- **تعاون کار ردیابی:** رادار اور سیٹلائٹ سینسرز کے لیے ہمیشہ نظر آنے والا، طیاروں کے لیے ADS-B ٹرانسپونڈرز کی طرح اپنا سٹیٹ ویکٹر نشر کرتا ہے۔

HAOV فریم ورک اس طرح کے گاڑیوں کی سرٹیفیکیشن **پرفارمنس پر مبنی** کی بجائے **ہارڈ ویئر پر مبنی** معیاروں کے تحت اجازت دے گا — انجن یا ایندھن کی موجودگی کی بجائے توانائی کی رہائی، زمینی فٹ پرنٹ، اور خود مختار نزول کی صلاحیت کی اصطلاحات میں حفاظت کو بیان کرنا۔

سمندری یا صحرائی راہداریاں نامزد کی جا سکتی ہیں جہاں HAOV مسلسل کام کر سکتے ہیں، موجودہ خلائی ٹریفک نیٹ ورکس کی نگرانی میں۔ ان کی چڑھائی ایک ہی موسم غبارہ سے کم خطرہ ہوائی سفر کے لیے، لیکن موجودہ قواعد ان کو کوئی راستہ نہیں دیتے۔

صبر کی سیاست

ضابطہ سازی ثقافت کا پیروکار ہے، اور ثقافت رفتار کا عادی ہے۔ خلائی نشانات دھکیل-کی-وزن تناسب اور مدار تک منٹوں میں ماپے جاتے ہیں۔ ایک گاڑی کا **تین ہفتہ** مدار تک لینے کا خیال، پہلی سننے پر، پس رفت لگتا ہے۔ لیکن صبر پائیداری کی قیمت ہے۔ ہوائی جہاز ایک مختلف پیمانہ تجویز کرتا ہے: نہ "ہم توانائی کو کتنی تیزی سے جلا سکتے ہیں" بلکہ "ہم اسے کتنی مسلسل جمع کر سکتے ہیں۔"

لانچ ونڈوز اور شمارش معکوس کی عادی خلائی ایجنسیوں کے لیے، اس طرح کا گاڑی آپریشنز میں تبدیلی کا مطالبہ کرتا ہے: سیکنڈز کی بجائے موسموں کے مطابق مشن پلاننگ؛ پلیٹ فارم دستیابیت کی بجائے سورج کی جیومیٹری پر منحصر مدار داخلے۔ تاہم، یہ تبدیلی **سٹیٹ انفراسٹرکچر** کی طرف وسیع موڑ سے ہم آہنگ ہے — شمسی-برقی خلائی جہاز، دوبارہ استعمال شدہ اسٹیشنز، مستقل موسمی پلیٹ فارمز۔

حکمت عملی قدر

ایک دوبارہ استعمال شدہ شمسی-EAD گاڑی صلاحیتوں کی پیشکش کرتی ہے جو کوئی راکٹ یا طیارہ میچ نہیں کر سکتا:

- **مسلسل اعلیٰ بلندی مشاہدہ اور مواصلات:** مکمل مدار سے پہلے، ہوائی جہاز اوپری سٹریٹوسفیئر میں مہینوں تیر سکتا ہے، ڈیٹا ریلی یا زمین امیجنگ ۔
- **بڑھتی ہوئی کارگو ڈلیوری:** چھوٹے پی لوڈز لانچ کے صوتی اور حرارتی صدموں کے بغیر نرم اُٹھائے جا سکتے ہیں۔

- **سیاروں کے مساوی:** مریخ پر، جہاں مدار رفتار صرف 3.6 km/s ہے اور فضائی دباؤ لمبی پاتھ آئن تیز ہونے کو ترجیح دیتا ہے، وہی آرکیٹیکچر اور بھی بہتر کام کر سکتا ہے۔
- **ماحولیاتی انتظام:** اخراج نہیں، ایندھن لیکیج نہیں، ناقابل ذکر صوتی اثر۔

معاشی طور پر، پہلے آپریشنل HAOVs راکٹس کو تبدیل نہیں کریں گے بلکہ ان کو مکمل کریں گے، کارگو صبر فوری کی برتری والے نیشز کی خدمت کریں گے۔ حکمت عملی طور پر، قریب خلائی رسائی کو ایندھن سپلائی چینوں سے الگ کریں گے—پائیدار انفراسٹرکچر تلاش کرنے والی خلائی ایجنسیوں کے لیے ایک کشش خصوصیت۔

قاعدہ کتاب انجینئرنگ

ایک HAOV زمرہ بنانا لابی سے کم پیمائش ہے۔ ریگولیٹرز ڈیٹا پر بھروسہ کرتے ہیں۔ آگے کا راستہ تجرباتی شفافیت ہے:

1. **ہیلیم پر مبنی مظاہرے** دور دراز راہداریوں میں، راستہ، توانائی استعمال، اور ناکامی سلوک کو ریکارڈ کرنے کے لیے آلات وغیرہ ۔
2. **مسلسل ٹیلی میٹری** شہری ہوائی اور خلائی ٹریکنگ نیٹ ورکس کے ساتھ شئیر کی گئی، پیش گوئی شدہ اڑنے کی ڈائنامکس ثابت کرنے کے لیے۔
3. **سیمولیشن اور رسک ماڈلز** آباد علاقوں پر بدترین صورت kinetik توانائی بہاؤ کی ناقابل ذکر ہونے کو دکھاتے ہیں۔

ایک بار ایجنسیاں دیکھ لیں کہ HAOV طیاروں یا زمینی آبادیوں کو نقصان نہیں پہنچا سکتا، تو قانونی آرکیٹیکچر کا پائیکار ہوگا—اعلیٰ بلندی غباروں اور ڈرونز سے پہلے جیسا۔

اخلاقی جہت

آہستہ اڑنا اخلاقی وزن رکھتا ہے۔ کیمیائی لانچرز انجینئرز کی بے احتیاطی کی وجہ سے آلودہ نہیں کرتے بلکہ کیونکہ فزکس ان کی گرمی کو دوبارہ ری سائیکل کرنے کا وقت نہیں دیتا۔ شمسی ہوائی جہاز، اس کے برعکس، کچھ بھی ناقابل واپس لے جانے والا استعمال نہیں کرتا۔ شور کو خاموشی سے تبدیل کرتا ہے، فلیش کو چمک سے۔ اس کی چڑھائی زمین سے ایک روشن، بے عجلت نقطہ کے طور پر نظر آئے گی، ایک انسانی مصنوع جو تشدد کے بغیر چڑھتا ہے۔

ایک عجلت کی عمر میں، اس طرح کا جان بوجھ کر حرکت ایک بیان ہے: کہ تکنیکی طموح گہرا ہونے کے لیے دھماکہ خیز ہونے کی ضرورت نہیں ہے۔

روشنی کی صبر

جب ایک راکٹ مدار تک پہنچتا ہے، تو یہ وحشی تیز ہونے سے کرتا ہے: جلنے کے سیکنڈ جو آسمان کو لرزاتے ہیں۔ الیکٹروایئروڈائنامک ہوائی جہاز مختلف طریقے سے پہنچتا ہے۔ اس کی جلد کو مارنے والا ہر فوٹون ایک سرگوشی کی حرکت کا حصہ دیتا ہے، الیکٹرانز، آئنز، اور Maxwell مساواتوں کی پرسکون ریاضی سے ثالثی۔ تین ہفتوں میں یہ سرگوشیاں مدار میں جمع ہو جاتی ہیں۔

وہی اظہار—$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$—جو لیبارٹری میں ایک مائیکرو ایمپیئر آئن ڈریفٹ بیان کرتا ہے، اوپری فضا سے گزرنے والے ہزار ٹن اٹھانے والے جسم کو بھی کنٹرول کرتا ہے۔پیمانہ بدلتا ہے؛ اصول نہیں۔ Maxwell کا ٹینسر، Coulomb کا قانون، اور سورج کی روشنی کا صبر عالمگیر ہیں۔

اگر انسانیت اس صبر کو استحصال کرنا سیکھ لے، تو ہم زمین چھوڑنے کا ایک نیا طریقہ حاصل کرتے ہیں — ایک جو غیر محدود دہرایا جا سکتا ہے، وہی ستارہ جو ہمیں برقرار رکھتا ہے، سے چلایا جاتا ہے۔

واپس پلٹنے والے اڑنے کی ایک دور کی طرف

کیمیائی راکٹ سائنس ایک طرفہ اشارہ ہے: مدار تک پہنچنے کے لیے بے حد کوشش، اور دوبارہ داخل ہونے پر اچانک خاتمہ۔ الیکٹروایئروڈائنامک ہوائی جہاز ایک **واپس پلٹنے** والا راستہ تجویز کرتا ہے۔ یہ مرضی کے مطابق اُٹھ سکتا اور اتر سکتا ہے، ٹروپوسفیئر سے مدار تک کہیں بھی رہ سکتا ہے۔ یہ خلائی جہاز اور رہائش دونوں ہے، گاڑی اور اسٹیشن۔

اس تسلسل میں ایک فلسفیانہ الٹ ہے: خلائی پرواز جدائی کے طور پر نہیں بلکہ فضا کی توسیع کے طور پر۔ ہوا سے خلائی کی طرف گرادیانٹ نیویگیٹیبل علاقہ بن جاتا ہے۔ اس طرح کی گاڑیاں موسمیات اور خلائی سائنس کے درمیان لائن کو دھندلا دیں گی، "فضائی کنارہ" کو رکاوٹ کی بجائے ایک زندہ کام کی جگہ میں تبدیل کر دیں گی۔

اختتامی غور و فکر

کوئی نئی فزکس درکار نہیں — صرف برداشت، درستگی، اور دوبارہ تصور شدہ ضابطہ سازی۔ مدار کی توانائی کا بجٹ شمسی روشنی سے ادا کیا جا سکتا ہے؛ دھکیل برقی میدانوں سے پیدا ہو سکتی ہے جو آئنز پر کام کرتے ہیں؛ وقت انجینئرز کی صبر سے قرض لیا جا سکتا ہے۔

رکاوٹیں ثقافتی اور بیوروکریٹک ہیں: ایجنسیوں کو یقین دلانا کہ غبارہ جیسی چیز ریاضی اور استقامت سے سیٹلائٹ بن سکتی ہے۔ تاہم، ہر تبدیل کرنے والی ٹیکنالوجی کاغذی کام میں ایک انومالی سے شروع ہوئی۔

جب ان شمسی الیکٹروایئروڈائنامک برتنوں کا پہلا اُٹھے، تو اس کی پیش رفت گھنٹہ بہ گھنٹہ تقریباً ناقابل احساس ہوگی۔ لیکن دن بہ دن یہ رفتار جمع کرے گا، جب تک کہ آخر میں موسم کی دسترس سے باہر پھسل نہ جائے۔ کوئی گھن گرج نہیں ہوگی — صرف میدانوں کا ہلکا، مسلسل گنگنان اور سورج کی روشنی کی مستحکم جمع ہونے والی حرکت۔

یہ **دوبارہ استعمال، پائیدار، اور نرم مدار تک رسائی** کی شروعات کو نشان زد کرے گا: اُٹھنے، اڑنے، اور — کبھی کوئی ملیت نہ جلانے — مدار میں داخل ہونے کا ایک طریقہ۔

حوالہ جات اور مزید پڑھنے

- **Rise Fly Orbit پروجیکٹ:** https://riseflyorbit.org/ — شمسی توانائی والے ہوائی جہاز-کی-مدار تصور اور متعلقہ تحقیق کا جائزہ۔
- **الیکٹروایئروڈائنامک پیش رفت مضمون:**

  https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html — Maxwell تناؤ ٹینسر اور Coulomb جسم قوت فارمولیشن استعمال کرتے ہوئے الیکٹروایئروڈائنامک دھکیل کا گہرا نظریاتی علاج۔
- Barrett, S. et al., **Nature** (2018). "Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion." — ایک فکسڈ ونگ آئن چلنے والے طیارہ کا پہلا مظاہرہ۔
- 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. — توانائی بجٹ اور Δv غور و فکر میں موازنہ کے لیے۔

- NASA Glenn Research Center, “Solar Electric Propulsion Basics.” — اعلیٰ کارکردگی برقی دھکیل سسٹمز پر پس منظر۔