

עלייה, טיסה, מסלול

ספינת אוויר אלקטרו-אווירודינמית המופעלת על אנרגיה סולארית

לגישה בר-קיימא לחלל

חזון ומבנים פיזיקליים

חלום הטיסה היה תמיד תחרות בין סבלנות לכוח. הנווטים הבלונים המוקדמים של המאה ה-18 עלו בעדינות לשמיים באמצעות גזים צפים, בעוד מהנדסי הטילים של המאה ה-20 קרעו דרכם באש. שתי הגישות חולקות את אותו מטרה – להימלט מעריצות הכבידה – אך שונות באופן רדיקלי בפילוסופיה. אחת משתמשת באוויר כשותף; השנייה רואה בו מכשול. בין שתי הקצוות הללו נמצאת דרך שלישית, שעדיין לא מומשה בפועל אך כבר אינה בלתי אפשרית בעיקרו: **ספינת אוויר המופעלת על אנרגיה סולארית שיכולה לטוס למסלול**, עולה תחילה בציפה, אחר כך בנשיאה אווירודינמית, ולבסוף בתמיכה צנטריפוגלית, הכל ללא דלק כימי.

בלב הקונספט הזה נמצאת **הנעה אלקטרו-אווירודינמית (EAD)** – צורה של דחף חשמלי המשתמשת בשדות חשמליים כדי להאיץ יונים באוויר. היונים המואצים מעבירים תנע למולקולות ניטרליות, ויוצרים זרימה המונית ודחף נקי על האלקטרודות. בניגוד לטיל, שחייב לשאת מסת תגובה, או להבייה הדורשת להבים נעים, ההנעה האלקטרו-אווירודינמית פועלת **ללא חלקים נעים וללא פליטות על הסיפון**, רק אור שמש ואוויר. כאשר היא מחוברת למערך סולארי בעל יעילות גבוהה וממוקמת על גוף נושא גדול וקל במיוחד, היא מספקת את המרכיב החסר להאצה מתמשכת בשכבות העליונות של האטמוספירה, שבהן ההתנגדות נמוכה אך האוויר עדיין נוכח.

ההצעה פשוטה לתיאור אך מאתגרת לביצוע:

1. **עלייה** – ספינת אוויר צפה ממולאת במים או בהליום עולה באופן פסיבי לסטרטוספירה, רחוק מהמזג אוויר ומהתעבורה האווירית.
2. **טיסה** – ספינת האוויר מאיצה אופקית באמצעות דחף EAD, מגבירה את המהירות לאט תוך עלייה לאוויר דליל יותר כדי להפחית התנגדות.
3. **מסלול** – לאחר שבועות של האצה רציפה, הכוח הצנטריפוגלי מאזן את הכבידה; הרכב כבר אינו זקוק לנשיאה, והופך ללוויין בהתמדה ולא בפיצוץ.

הרעיון אינו פנטזיה. כל צעד שורשי בפיזיקה ידועה: ציפה, אנרגיה סולארית, אלקטרוסטטיקה ומכניקת מסלולים. מה שמשתנה הוא סולם הזמן. במקום דקות של בעירה, אנו שוקלים **שבועות של אור שמש**. במקום טונות של דלק, אנו מסתמכים על **שדות וסבלנות**.

אנרגיית המסלול

כל דיון בטיסות חלל מתחיל ומסתיים באנרגיה. האנרגיה הקינטית לק"ג המונית הנדרשת לשמירה על מסלול מעגלי סביב כדור הארץ ניתנת על ידי

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

כאשר v היא המהירות המסלולית. למסלול נמוך סביב כדור הארץ, $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$, כך $E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$, או בערך **30 מגה-ג'אול לק"ג**. זה שווה ערך לאנרגיה של שריפת כ-ק"ג בנזין

לכל ק"ג המונח במסלול. זה מספר גדול, אך לא אסטרונומי.

עכשיו השווה זאת לזרם הסולארי הרציף בפסגת אטמוספירת כדור הארץ: כ-**1,360 וואט למטר רבוע**. אם נוכל להמיר אפילו חלק קטן מכך לאנרגיה קינטית על פני ימים או שבועות, נוכל בעיקרו לספק את האנרגיה המסלולית הנדרשת. מערכי פוטו-וולטאים מודרניים בעלי ביצועים גבוהים בעלי הספקים ספציפיים בסדר גודל של מאות וואטים לק"ג. ב- $P_{sp} = 300 \text{ W/kg}$, ק"ג מערך מייצר 300 ג'אול לשנייה. על פני יום (8.64×10^4 שניות), זה 2.6×10^7 ג'אול – דומה לאנרגיה המסלולית של ק"ג המון.

השוואה פשוטה זו מראה את הלוגיקה של הגישה הזו. האנרגיה למסלול זמינה מהשמש בכ-**יום אחד לק"ג מערך**, אם ניתן להמיר אותה ביעילות לדחף. האתגר המעשי הוא שהתנגדות וחוסר יעילות סופגים את רובה. הפתרון הוא גובה וסבלנות: עבוד באוויר דליל שבו ההתנגדות נמוכה, ומתח את התהליך על פני שבועות במקום שעות.

החלפת זמן בדלק

טילים פותרים את בעיית ההתנגדות בכוח גס – הם הולכים כל כך מהר שהאוויר לא רלוונטי. ספינות אוויר, לעומת זאת, עובדות עם האוויר; הן יכולות להישאר. אם זמן נחשב למשאב צריכה, הוא יכול להחליף מסת דלק. משימת ספינת האוויר היא לשמור על האצה קטנה אך עקבית לאורך תקופות ארוכות, אולי **בסדר גודל של 10^{-3} m/s^2** , עד להשגת המהירות המסלולית.

אם העלייה למסלול אורכת שלושה שבועות, או כ- 1.8×10^6 שניות, ההאצה הממוצעת הנדרשת היא

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

– פחות ממחצית אלפית מכוח הכבידה של כדור הארץ. האצעות כאלה קלות להתמודדות עבור ספינת אוויר; הן לא גורמות למתח מבני. הקושי היחיד הוא **שמירה עליה**, בהתחשב בכמות הקטנה של הדחף הזמין ליחידת הספק.

אם לרכב יש מסה של 10^3 kg , האצה ממוצעת של $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ דורשת רק כ-**4 ניוטון דחף נקי** – פחות ממשקל תפוח. האבסורד הנראה להגיע למסלול בדחף של תפוח נעלם כאשר הזמן מושט לשבועות.

ציפה והדרך לאוויר דליל

ספינת האוויר מתחילה את מסעה כמו כל כלי קל יותר מהאוויר: על ידי דחיקת אוויר בגז קל יותר. הכוח הצפה ניתן על ידי

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

כאשר V הוא נפח הגז ו- ρ הצפיפויות המתאימות. ליד פני הים, $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$, מימן מספק מעט יותר נשיאה, כ-**1.1 ק"ג למטר מעוקב**, $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$ ו- $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$. ההפרש נראה קטן אך מצטבר על פני אלפי מטרים מעוקבים. בהשוואה ל-**1.0 ק"ג למטר מעוקב** להליום. ההפרש נראה קטן אך מצטבר על פני אלפי מטרים מעוקבים.

מימן מציע יתרון ביצועים מדיד, אם כי על חשבון דליקות. הוא דורש פרוטוקולים קפדניים של אזורי חשמל ופליטה, במיוחד מאחר שהרכב גם נושא מערכות אלקטרוסטטיות מתח גבוה. הלום מציע נשיאה נמוכה יותר אך אינטריות מלאה. שני הגזים ברי כושר; הבחירה תלויה בסובלנות הסיכון של המשימה. לבדיקות מוקדמות ציבוריות או באזורים מיושבים, הלום עדיף. לניסיונות מרוחקים או מסלוליים, מימן עשוי להיות מוצדק.

כשהרכב עולה, צפיפות האוויר יורדת באופן אקספוננציאלי בערך עם גובה סולם $H \approx 7.5 \text{ km}$. ב-30 ק"מ, הצפיפות היא כ- $1/65$ מפני הים; ב-50 ק"מ $1/300$. הציפה מחלישה בהתאם, אך גם ההתנגדות. הרכב מתוכנן להגיע ל-**ציפה ניטרלית** בגובה שבו עוצמת השמש נשארת גבוהה אך לחץ דינמי מינימלי – בערך 30–40 ק"מ בסטרטוספירה. משם מתחילה האצה אופקית.

נשיאה, התנגדות ולחץ דינמי

כדי לשמור על גובה בזמן האצה, ספינת האוויר עשויה להסתמך חלקית על **נשיאה אווירודינמית**. עבור גוף נושא, כוחות הנשיאה וההתנגדות הם

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

כאשר A הוא שטח ההתייחסות, C_L ו- C_D מקדמי הנשיאה וההתנגדות. מכיוון ש- ρ קטן בגובה, הכוחות הללו קטנים; הרכב מפצה על **שטח גדול ו-משקל נמוך**.

היחס $L/D = C_L/C_D$ קובע את יעילות הטיסה האווירודינמית. גליידרים מודרניים יכולים לעלות על $L/D = 50$ באוויר צפוף. ספינת אוויר על-קלה מתוכננת עם חלקלקות קיצונית ותוספות מינימליות יכולה באופן סביר לשמור על L/D יעיל של 10–20 אפילו באוויר דליל. אך כשהאוויר דליל יותר, המעבר לטיסה מסלולית אינו מוגבל על ידי נשיאה – הוא מנוהל על ידי **הספק התנגדות**.

ההספק הנדרש להתגבר על התנגדות הוא

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

והוא סקייל עם קוביית המהירות. זו הסיבה שטילים מאיצים במהירות: אם הם נשארים, ההתנגדות צורכת את אנרגיתם באופן אקספוננציאלי. ספינת האוויר לוקחת את הדרך ההפוכה: היא מאיצה שם ש- ρ כל כך קטן ש- P_D נשאר מוגבל אפילו בקילומטרים לשנייה.

אם, למשל, $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ (טיפוסי ליד גובה 60 ק"מ), $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, ו- $v = 1,000 \text{ m/s}$ אז

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

או 25 קילוואט – בקלות בטווח סולארי. לעומת זאת, ברמת פני הים אותה תצורה תצטרך 25 גיגה-וואט.

הכלל פשוט: **אוויר דליל קונה זמן, ו-זמן מחליף דלק**.

ההזדמנות האלקטרו-אווירודינמית

בתחילת המאה ה-20, פיזיקאים הבחינו ששדות חשמליים חזקים ליד אלקטרודות חדות באוויר מייצרים כתר כחול קלוש וזרימת אוויר עדינה. "הרוח החשמלית" הזו נובעת מהעברת תנע בין יונים לניטרליים. היא נחשבה בעיקר לסקרנות עד שהאלקטרוניקה מתח גבוהה בוגרה. כאשר מסודרת כראוי, האפקט יכול לייצר דחף מדיד.

ההנעה האלקטרו-אווירודינמית פועלת על ידי יישום מתח גבוה בין **מאיין**, חוט דק או קצה שמייצר יונים, ו-**אספן**, אלקטרוד רחבה יותר שמקבל אותם. היונים מאיצים בשדה החשמלי, מתנגשים במולקולות אוויר ניטרליות ומעבירים תנע קדימה לגז. המכשיר חש דחף שווה והפוך.

בעוד שהדגמות מוקדמות היו צנועות, ניסויים אחרונים – כולל **מטוס יוני** בעל כנפיים קבועות שטופח על ידי MIT ב-2018 – הוכיחו שטיסה יציבה ושקטה אפשרית. עם זאת, הרעיון קודם לנקודת הציון הזו. שנים קודם לכן, מחקר ב-**ניסוחים מבוססי-טנסור מקסוול** של דחף אלקטרו-אווירודינמי הראה כיצד אותה פיזיקה יכולה להתמקד בגיאומטריות גדולות יותר ואוויר דליל יותר. בפורמליזם הזה, הדחף אינו נובע מ"רוח" אלא מ-**מתח אלקטרומגנטי** משולב על פני נפח אזור הפליטה.

המשוואה הרלוונטית נגזרת מ-**טנסור מתח מקסוול $\mathbf{T}$** , ש עבור שדה אלקטרוסטטי הוא

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

כאשר ϵ היא הפרמיטיביות של המדיום, $\mathbf{E}$ הוא וקטור שדה חשמלי, ו- $\mathbf{I}$ הוא טנסור הזהות. הכוח האלקטרומגנטי הנקי על גוף ניתן על ידי אינטגרציה של טנסור זה על פני השטח שלו:

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

בתוך האזור היוני, זה מפשט ל-**צפיפות כוח נפחית**

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

כאשר ρ_e היא צפיפות המטען המקומית. בגז בעל פרמיטיביות אחידה בערך, הטווח השני נעלם, משאיר את כוח הגוף קולון האלגנטי

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

הביטוי המקומפק הזה הוא המהות של הנעה אלקטרו-אווירודינמית: בכל מקום ששדה חשמלי ומטען מרחבי קיימים יחד, כוח גוף נקי פועל על המדיום.

היונים עצמם מעטים, אך תנעם מועבר לניטרליים דרך התנגשויות. המסלול החופשי הממוצע λ בין התנגשויות קובע כיצד התנע מתפשט; הוא סקילי הפוך ללחץ. בלחצים נמוכים יותר, יונים נוסעים רחוק יותר להתנגשות, ויעילות העברת התנע משתנה. קיים **רצועת לחץ אופטימלית** שבה יונים עדיין יכולים להתנגש מספיק לעיתים קרובות כדי לדחוף את הגז אך לא כל כך לעיתים קרובות שהם מבזבזים אנרגיה על חימומו. לאטמוספירת כדור הארץ, הרצועה הזו נמצאת בערך בין כמה טורים לכמה מילי-טורים – בדיוק הטווח שנמצא בין 40 ל-80 ק"מ גובה.

מעטפת ספינת האוויר הופכת כך למארכת האידיאלית לוחות אלקטרו-אווירודינמיים הפועלים בסביבתם הטבעית. האטמוספירה עצמה היא מסת התגובה.

הפיזיקה של הנעה אלקטרו-אווירודינמית

במבט ראשון, הנעה אלקטרו-אווירודינמית נראית לא סבירה. הרעיון של סט אלקטרודות שקט ונייח שמייצר דחף חזק מספיק להזזת ספינת אוויר נראה מנוגד לניסיון יומיומי. היעדר מסת תגובה נראית או מכונות נעות מאתגר את האינטואיציה. עם זאת, כל יון שצף בשדה חשמלי נושא תנע, ותנע שמור. השדה פועל כמנוף בלתי נראה, והאוויר כנוזל העבודה שלו.

היסודות של התופעה הזו אינם בפיזיקת פלזמה אקזוטית אלא ב-**משוואות מקסוול** ובביטוי המכני שלהן, **טנסור מתח מקסוול**. הניסוח הטנסורי הזה מבהיר ששדות חשמליים אינם רק דפוסי פוטנציאל – הם מאחסנים ומעבירים מתח מכני במדיום הסובב.

מתח שדה וכוח גוף קולון

טנסור מתח מקסוול באלקטרוסטטיקה הוא

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

כאשר ε היא הפרמיטיביות, $\mathbf{E}$ השדה החשמלי, ו- $\mathbf{I}$ טנסור הזהות. הטווח הראשון מייצג לחץ כיווני לאורך קווי השדה, והטווח השני את המתח האיזוטרופי המתנגד להתפשטות השדה.

הכוח האלקטרומגנטי הנקי על גוף שטבול בשדה כזה הוא אינטגרל שטחי של טנסור זה:

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

מבחינה פיזיקלית, הביטוי הזה אומר לנו שהשדה החשמלי מפעיל מתח על הגבולות של כל אזור המכיל מטען או גרדיאנטים דיאלקטריים. אך ניתן לכתוב אותו מחדש בצורה נפחית מקומית יותר באמצעות משפט הגבול:

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

הטווח הראשון, $\rho_e \mathbf{E}$, הוא כוח גוף קולון המוכר: צפיפות מטען חווה שדה. הטווח השני חשוב רק שם שהפרמיטיביות של המדיום משתנה במהירות, כמו בגבולות חומרים. באוויר, ε אחידה בעיקרון, כך $\nabla \varepsilon \approx 0$, משאיר

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

המשוואה הפשוטה לכאורה הזו מקודדת את כל עיקרון ההנעה האלקטרו-אווירודינמית. אם קיים נפח גז שבו יונים (עם צפיפות ρ_e) חווים שדה חשמלי $\mathbf{E}$, אז צפיפות כוח נקי פועלת על הגז ההוא. גודל הדחף הכולל הוא אינטגרל נפחי של $\rho_e \mathbf{E}$ על אזור הפליטה:

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

האלקטרודות חשות תגובה שווה והפוכה, ומייצרות דחף.

העברת תנע ותפקיד ההתנגשויות

יונים באוויר נדירים נוסעים רחוק לפני התנגשות עם מולקולות ניטרליות. המסלול החופשי הממוצע λ הפוך פרופורציונלי ללחץ הגז p ולשטח החתך σ :

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

כאשר d הוא קוטר המולקולה. ברמת פני הים, λ זעיר – בסדר גודל של עשרות ננומטרים. במזוספירה (סביב 70 ק"מ), λ מתמתח למילימטרים או סנטימטרים.

כאשר יון מאיץ תחת השדה, הוא מעביר תנע לניטרליים דרך התנגשויות. כל התנגשות משתפת חלק מהתנע המכוון של היום; ההשפעה המצטברת היא **זרימה ניטרלית המונית** – מה שניסויים קוראים **רוח יונית**. הגז זורם ממאין לאספן, והאלקטרודות חשות דחף תגובה הפוך.

באוויר צפוף מאוד, יונים מתנגשים יותר מדי; מהירות הנדירה שלהם נשבעת, ואנרגיה מאבדת כחום. באוויר דליל במיוחד, התנגשויות נדירות מדי; היונים עפים חופשי אך אינם גוררים ביעילות את הניטרליים. בין שני הקצוות הללו נמצא **נקודה מתוקה** שבה המסלול החופשי הממוצע מאפשר העברת תנע יעילה – בדיוק האזור שספינת האוויר עוברת בדרכה לחלל.

בלחצים של כ- 10^{-2} עד 10^{-4} בר (מקביל לגובה 40–80 ק"מ), יונים יכולים להאיץ על פני מרחקים מקרוסקופיים לפני התנגשות, אך התנגשויות עדיין מתרחשות מספיק לעיתים קרובות כדי לייצר דחף. הקופלינג האלקטרו-אווירודינמי בין שדה לגז הוא במצבו הטוב ביותר.

יחס ההספק-דחף

ההספק החשמלי המועבר לפליטה הוא $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$, שהוא בערך IV לזרם יציב I ומתח V . הפלט המכני השימושי הוא הדחף כפול מהירות המסה האוויר המואצת, אך בהנעה במצב יציב אנו בעיקר מעוניינים ב-יחס דחף להספק, T/P .

מחקרים אמפיריים דיווחו על ערכי T/P הנעים בין כמה מילי-ניוטון לווואט (mN/W) לכמעט 0.1 N/W בתנאים מיטביים. באוויר אטמוספרי בלחץ סטנדרטי, EAD לא יעילה; אך בלחצים מופחתים, ניידות היום גדלה וצפיפות הזרם יכולה להישמר בלחצים נמוכים יותר, משפרת T/P .

טיעון מימדי פשוט מקשר את צפיפות כוח הגוף $f = \rho_e E$ לצפיפות הזרם $J = \rho_e \mu E$, כאשר μ היא ניידות היום. אז

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

אז עבור צפיפות זרם נתונה, ניידות גבוהה יותר (מושגת בלחץ נמוך יותר) נותנת יותר דחף לזרם. ההספק החשמלי הכולל הוא $P = JEV$, אז הדחף להספק סקיל כמו

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

מה שמרמז ששדות חשמליים נמוכים יותר או ניידות יונים גבוהה יותר מגבירות יעילות. אך E נמוך יותר גם מפחית זרם וכך דחף כולל, אז שוב קיים משטר אופטימלי.

היחסים הללו אינם סקרניות תיאורטיות – הם קובעים את עיצוב כל לוח EAD. בגובה נתון, המתח, מרווח הפער, וגיאומטריית המאין חייבים להיות מכוונים כך ש-עקומת פאשן (המקשרת מתח פריצה למוצר לחץ-מרחק) תתקיים אך לא תעלה עליו.

חוק פאשן לאוויר ניתן לביטוי בערך כ-

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

כאשר A ו- B קבועים אמפיריים ו- γ_{se} הוא מקדם פליטת אלקטרונים משני. הגיאומטריה המשתנה של ספינת האוויר מאפשרת ל- d , מרווח האלקטרודות, להיות מותאמת דינמית כדי לשמור על פליטת קורונה יעילה ללא קשת כשהלחץ הסביבתי יורד בעלייה.

גיאומטריית שדה וטופולוגיית מתח

הדגמות "ליפטר" מוקדמות השתמשו בחוט דק כמאין ופזיל שטוח כאספן. קווי השדה היו כפופים חזק, ורוב האנרגיה הלכה על שמירה על הקורונה במקום ייצור דחף שימושי. היעילות הייתה נמוכה כי **שדה מתח מקסוול** לא היה מיושר עם כיוון הדחף הרצוי.

התובנה המרכזית – פותחה בעבודה תיאורטית קודמת למטוס היוני של MIT – הייתה לטפל בשדה החשמלי לא כתוצר לוואי אלא כמשתנה עיצוב ראשי. הדחף נובע מ-**אינטגרל מתח אלקטרומגנטי** לאורך קווי השדה, אז המטרה היא לעצב את קווי אלה להיות מקבילים ועקביים על פני אזור רחב. האנלוגיה היא

אוורודינמית: כמו זרימה למינרית חלקה שממזערת התנגדות, טופולוגיית שדה אלקטרוסטטית חלקה ממקסמת מתח מכוון.

"הנדסת טופולוגיית שדה" הזו מחדש מגדירה את המכשיר כאקטואטור אלקטרוסטטי במקום צעצוע פלזמה. על ידי שליטה בעקמומיות האלקטרודות, פוטנציאלים שומרים, ושכבות דיאלקטריות, ניתן להפוך את E לכמעט אחיד על פני מסלול ההאצה, ולייצר מתח קווי-כמעט ולהימנע מהתמקדות עצמית הרסנית הגורמת לקשתות.

התוצאה היא סקיילביליות. כאשר אלקטרודות משוטחות ללוחות מטר רבועי, כל אחד עם ממיר מתח גבוה ותורת שליטה משלו, כל מעטפת ספינת האוויר יכולה להפוך למערך EAD מפוזר ענק. אין חלקים נעים לסנכרון, רק שדות לתיאום.

צפיפות דחף והדרך לסקיילביליות

צפיפות כוח גוף נפחית היא $f = \rho_e E$. צפיפות המטען בפליטת קורונה טיפוסית בלחץ אטמוספרי היא בסדר גודל של 10^{-5} עד 10^{-3} C/m^3 . בלחץ מופחת, היא יכולה לרדת מעט, אך השדה החשמלי E יכול להיות מוגבר בבטחה לעשרות קילו-וולטים לסנטימטר ללא פריצה.

אם $\rho_e = 10^{-4} \text{ C/m}^3$ ו- $E = 10^5 \text{ V/m}$, צפיפות הכוח היא $f = 10 \text{ N/m}^3$. מפוזרת על פני אזור פעיל בעובי 1 מ', זה נותן לחץ שטח של 10 N/m^2 – שווה ערך לכמה מילי-פסקלים. זה עשוי להישמע קטן, אך על פני אלפי מטרים רבועים זה הופך משמעותי. שטח 1000 m^2 עם מתח 10 N/m^2 מייצר $10,000 \text{ N}$ דחף, מספיק להאצת רכב רב-טון ברמות מילי-g – בדיוק המשטר הנדרש להרמת מסלול שבועית.

הערכות כאלה ממחישות מדוע EAD, למרות צפיפות ההספק הנמוכה שלה, הופכת ישימה ל-**מבנים גדולים וקלים** באוויר דליל. בניגוד לצינור טיל, שזוכה ביעילות רק כשצפיפות ההספק גבוהה, EAD זוכה מיתרון משטח. מעטפת ספינת האוויר מספקת שטח בשפע; המרתה לפני פעילה היא התאמה טבעית.

אזור המתוק של האטמוספירה העליונה

לכל מערכת פיזיקלית יש נישא תפעולית. עבור הנעה EAD, המשטר הטוב ביותר הוא שבו לחץ הגז נמוך מספיק כדי לאפשר מתחים גבוהים ומסלולים חופשיים ארוכים של יונים, אך לא כל כך נמוך שהפלזמה הופכת ללא-התנגשות.

מתחת לכ-20 ק"מ, האטמוספירה צפופה מדי: ניידות היון נמוכה, מתחי פריצה גבוהים, ואנרגיה מבוזבזת על חימום הגז. מעל כ-100 ק"מ, האוויר נדיר מדי: איוניזציה אינה ניתנת לשמירה רציפה, ומסת התגובה הניטרלית נעלמת. בין כ-40 ל-80 ק"מ נמצאת **רצועת מעבר** – המזוספירה התחתונה – שבה הנעה EAD יכולה לייצר את יחסי הדחף-להספק הטובים ביותר שלה.

בנוחות, זה גם טווח הגבהים שבו אנרגיה סולארית נשארת כמעט ללא דעיכה והתנגדות אוורודינמית קטנה בסדרי גודל ממשטח הים. זה חלון צר אך סלחני, מסדרון טבעי לסוג חדש של רכב: לא מטוס ולא טיל, אלא משהו שחי בחפיפה ביניהם.

יעילות זרימת אנרגיה

בכל רגע, ההספק החשמלי הקלט P מחולק בין:

- הספק דחף מכני שימושי $P_T = T v_{\text{eff}}$, כאשר v_{eff} הוא המהירות האפקטיבית של זרימת האוויר.
- הפסדים באיוניזציה P_i , האנרגיה הנדרשת לשמירה על הפלזמה.
- הפסדים התנגדתיים P_r , עקב חימום אוהמי ודליפה.

4. הפסדים קרינתיים P_γ , המופעלים כאור (הברק הקורונה המוכר).

היעילות הכוללת היא $\eta = P_T/P$. ניסויים מצביעים על כך ש- η יכול להגיע לכמה אחוזים באוויר צפוף ואולי עשרות אחוזים בפעולה בלחץ נמוך מיטבית. אם כי צנועים, המספרים הללו מספיקים למערכת סולארית הפועלת על פני משכים ארוכים, שבה יעילות יכולה להוחלף בזמן.

בניגוד להנעה כימית, שחייבת להגיע ליעילות גבוהה לשנייה כדי למזער דלק, ספינת אוויר EAD סולארית יכולה להרשות לעצמה חוסר יעילות אם היא יכולה **לפעול ללא הגבלה**. מדד ההצלחה אינו דחף ספציפי אלא **סבלנות ספציפית**: ג'אולים מצטברים על פני ימים.

ממתח מקסוול לדחף מקרוסקופי

כדי להמחיש את הקשר בין תורת השדה לניסיון היומיומי, שקול קונדנסטור לוחות מקבילים בוואקום. הלחץ בין הלוחות הוא $p = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ אם $E = 10^6 \text{ V/m}$, אז $p \approx 4.4 \text{ N/m}^2$. הכפל בשטח, וקבל את הכוח המכני הנדרש להפרדת הלוחות. מתח אלקטרוסטטי הוא ממש לחץ מכני.

הנעה EAD מחליפה לוח אחד באטמוספירה עצמה. היונים הם המדיום שבאמצעותו מתח השדה מועבר. במקום לחץ סטטי, אנו מקבלים זרימה מכוונת. המשוואה $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ היא האנלוג הדינמי של לחץ הקונדנסטור הסטטי.

כאשר מסוכמים על פני שטח ספינת האוויר, המתח המשולב הופך לווקטור דחף נקי, בדיוק כמו הלחץ המשולב על פני כנף נותן נשיאה. הנאנלוגיה עמוקה: נשיאה אווירודינמית היא זרימת תנע של אוויר מוסט על ידי שטח; דחף EAD הוא זרימת תנע של יונים מואצים על ידי שדה.

מטוס היוני של MIT והוכחה ניסויית

על פני עשורים, ספקנים דחו את EAD כסקרנות מעבדה. אז, ב-2018, מטוס כנפיים קבועים קטן שנבנה על ידי MIT הדגים **טיסה יציבה ללא מדחף** המופעלת אך ורק על ידי דחף אלקטרו-אווירודינמי. "מטוס היוני" שקל כ-2.5 ק"ג וטס עשרות מטרים על סוללה. יחס הדחף למשקל שלו היה קטן, אך ההישג היה היסטורי: הרכב הכבד יותר מהאוויר הראשון ששומר על טיסה על ידי הנעה יונית.

באופן מכריע, התיאוריה והבסיס הקונספטואלי שהובילו להדגמה הזו כבר היו בפיתוח עצמאי. המסגרת התיאורטית המוצגת ב-**הנעה אלקטרו-אווירודינמית** (ראו https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html) תיארה את אותו מנגנון במונחי **מתח מקסוול ו-כוח גוף קולון** שנים קודם, מדגישה טופולוגיית שדה וסקיילביליות במקום כימיית קורונה.

מטוס היוני של MIT הוכיח את מעשיות האפקט באוויר צפוף. פרויקט Rise-Fly-Orbit שואף להרחיב אותו לאוויר דליל, שבו הפיזיקה הופכת אפילו נוחה יותר. אם מטוס קטן יכול לטוס ב-1 בר, ספינת אוויר סולארית יכולה לטוס למסלול במיקרו-ברים, עם מספיק סבלנות ואור שמש.

מעלת הפשטות

הנעה EAD אלגנטית קונספטואלית: ללא חלקים נעים, ללא בעירה, ללא פליטות מהירות גבוהה, ללא קריוגניקה. הרכיבים שלה עמידים בטבעם – אלקטרודות, דיאלקטריקים, ממירי הספק, ועורי פוטו-וולטאיים. המערכת סקייל באופן טבעי עם שטח, לא עם מסה.

האתגר הטכני עובר מטרמודינמיקה ל-**הנדסת חשמל ומדעי החומרים**: מניעת שחיקה של קורונה, ניהול דליפת מטען, ושמירה על בידוד מתח גבוה בלחצים משתנים. אלה פתירים עם חומרים מודרניים ומיקרו-אלקטרוניקה.

מכיוון שמנגנון EAD תלוי רק בגיאומטריית שדה וניידות יונים, הוא **מודולרי באופן מובנה**. כל מטר רבוע מעור ספינת האוויר יכול להיות מטופל כטאבילה עם T/P ידועים ומאפייני מתח. הדחף הכולל של הרכב הוא סכום וקטורי של אלפי טאבילות עצמאיות. המודולריות הזו מאפשרת התדרדרות חנינית – כשל של כמה מודולים אינו פוגע בכל הרכב.

ספינת האוויר האלקטרו-אווירודינמית כמערכת

כאשר מחוברת לאנרגיה סולארית, הנעה EAD הופכת לא רק למקור דחף אלא **למערכת אקלים** לרכב. אותם שדות שמייצרים דחף גם מייננים גזי רעל, מפחיתים טעינה שטחית, ואולי משפיעים על תכונות שכבת הגבול. השדה החשמלי יכול אפילו לשמש כ"מפרש אלקטרוסטטי" מתכוונן, מתקשר חלש עם שדה המגנטי של כדור הארץ או הפלזמה הסביבתית באטמוספירה העליונה.

בטווח הארוך, ניתן לדמיין שליטה אקטיבית בהתנגדות על ידי מניפולציה של הפצות טעינה שטחיות – **מגן התנגדות אלקטרודינמי** שמשנה מתח שדה מקומי כדי לתקן מסלול טיסה ללא משטחי שליטה מכניים.

אפשרויות אלה מעבירות את הנעה EAD מעבר לסקרנות לתחום טכנולוגיית שליטת טיסה מצב מוצק כלל-מטרה – ישים בכל מקום שניתן לקוטב ולהאיץ גזים או פלזמות בשדות חשמליים.

ארכיטקטורת הנדסה ודינמיקת טיסה

היתרון היסודי של קונספט Rise-Fly-Orbit אינו בחומרים אקזוטיים או פיזיקה מהפכנית, אלא ב-**סידור מחדש של עקרונות מוכרים**. ציפה, אנרגיה סולארית ואלקטרוסטטיקה כולם מובנים היטב. החידוש הוא הדרך שבה הם מסודרים לרצף אחד: **עלייה ללא רגע של חוסר רציפות**.

טילים עוברים דרך משטרים נפרדים – שיגור, בעירה, החלקה, מסלול. ספינת האוויר האלקטרו-אווירודינמית, לעומת זאת, חווה רק מעברים הדרגתיים. היא עולה בקלילות, טסה בנשיאה, ומסלול באינרציה. כל שלב מתמזג לשלב הבא, מנוהל על ידי אותה אינטראקציה יציבה של כוחות צפה, אווירודינמיים ואלקטרוסטטיים.

המעטפת: מבנה כאטמוספירה

מעטפת ספינת האוויר חייבת לספק דרישות סותרות: היא חייבת להיות **קלה וחזקה, מוליכה ומבודדת, שקופה לאור שמש אך עמידה לקרינה**. אלה ניתנים ליישוב בבנייה שכבתית.

השכבה החיצונית יכולה להיות **פולימר מתכתי** – למשל, סרט דק של קפטון אלומיניום או פוליאיתילן טרפלט. השכבה הזו מספקת הגנה UV ומשמשת כשטח אלקטרודה חלקי ללוחות EAD. מתחתיה שכבה **דיאלקטרי** שמונעת פליטה לא רצויה ומגדירה את הפער לאלקטרודת האספן הפנימית. המבנה הפנימי הוא רשת של ממברנות מתוחות ותומכות ששומרות על הגיאומטריה הכוללת בלחץ יתר פנימי קטן, בסדר גודל $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$ – רק כמה אלפיות מלחץ האטמוספירה.

הלחץ העודף הזה מספיק כדי לשמור על המעטפת מתוחה אך לא מספיק כדי לגרום למסה מבנית משמעותית. בפועל, כל הרכב הוא קונדנסטור ענק וקל, עורו טעון וחי עם קווי שדה.

הנפח הפנימי ממולא בגז נושא – מימן או הלום. מכיוון שהלחץ העודף הנדרש קטן, הדרישות נשיאת העומס על החומר צנועות. האתגר העיקרי הוא חדירות גז והרס UV על פני משימות ארוכות, שניהם ניתנים לפתרון עם ציפויים מודרניים וסרטים שכבתיים.

מימן או הלום

בחירת הגז מעצבת את אישיות הרכב.

מימן מציע את הנשיאה הגבוהה ביותר, מספקת בערך 10% ציפה יותר מהלום. ההפרש הזה הופך משמעותי כאשר הנפח הכולל מגיע למיליוני מטרים מעוקבים. מימן גם קל יותר להשגה ואפילו ניתן לייצר במקום באמצעות אלקטרוליזה סולארית של מים. החיסרון שלו, כמובן, הוא דליקות.

נוכחות אלקטרוסטטיקה מתח גבוה הופכת ניהול מימן ללא-טריוויאלי. הבטיחות תלויה באזוריזציה מדוקדקת, מסכה אלקטרוסטטית, ופליטה. מודולי EAD עצמם אטומים ומפרידים מתאי הגז על ידי מחסומים דיאלקטריים, והפרשי פוטנציאל על פני הגוף ממוזערים על ידי הפצת מטען סימטרית.

הלום, לעומת זאת, אינרטי ובטוח אך מספק נשיאה נמוכה יותר ועלויות גבוהות יותר. החיסרון העיקרי שלו הוא מחסור; שימוש בקנה מידה גדול עלול להעמיס על האספקה. לרכבים ניסיוניים מוקדמים וטיסות הדגמה ציבוריות, הלום הוא הבחירה הזריזה. לניסיונות מסלוליים תפעוליים במסדרונות מרוחקים, מימן עשוי להיות מוצדק בביצועים ועלויות.

בכל מקרה, עיצוב המעטפת תואם ברובו; רק מערכות טיפול בגז ובטיחות שונות.

אנרגיה סולארית וניהול אנרגיה

השמש היא מנוע הרכב. כל וואט אנרגיה חשמלית מתחיל כאור שמש סופג בפוטו-וולטאי עור.

פוטו-וולטאיים בעלי יעילות גבוהה וקלים במיוחד – מורכבים סרט דק גליום-ארסן או פרובסקיט למינציה על פני ספינת האוויר – יכולים להשיג הספקים ספציפיים קרובים ל-**W/kg 400-300**. המערכים מסודרים קונפורמלית כדי לשמור על חלקלקות אווירודינמית. ניהול הספק מפוזר: כל סעיף פאנל מזין רדפן נקודת הספק מקסימלית מקומי (MPPT) שמסדיר מתח לבאס מתח גבוה שמזין את לוחות EAD.

מכיוון שהרכב חווה מחזורי יום-לילה, הוא נושא **באפר אנרגיה צנוע** – סוללות קלות או סופר-קפסיטורים – כדי לשמור על פעולות רמה נמוכה בחושך. אך אלה אינם גדולים; פילוסופיית עיצוב המערכת היא **הנעה סולארית ישירה**, לא אנרגיה מאוחסנת. בגבהים מסלוליים, הרכב יכול לרדוף אחרי אור שמש כמעט ברציפות, רק יורד לצל לזמן קצר.

שליטה תרמית מטופלת בקרינה. עם קונוקציה זניחה בגובה גבוה, דחיית חום מסתמכת על **שטחים בעלי emissivity גבוה** ומסלולים מוליכים לרדיאטורים. במזל, תהליך EAD יחסית קר – אין בעירה – והעומס התרמי העיקרי הוא מאור שמש סופג.

לוחות אלקטרו-אווירודינמיים

כל מטר רבוע של המעטפת פועל **כלוח EAD** – תא הנעה עצמאי הכולל מאיין, אספן ומעגל שליטה קטן. המאיין עשוי להיות רשת דקה של נקודות חדות או חוטים בפוטנציאל חיובי גבוה, בעוד האספן הוא רשת רחבה מחזיקה קרוב לקרקע או בפוטנציאל שלילי. החלל ביניהם הוא אזור פליטה מבוקר.

כאשר מופעל, הלוח יוצר שדה חשמלי E , מייצר צפיפות מטען ρ_e , ומייצר דחף מקומי $f = \rho_e E$ מכוון טנגנציאלית לאורך הפנים. על ידי מודולציה של המתחים על לוחות שונים, ספינת האוויר יכולה להיגוי,

להטות ולגלגל ללא חלקים נעים.

גיאומטריה אדפטיבית היא המפתח. כשלחץ הסביבה יורד עם הגובה, המסלול החופשי הממוצע גדל. כדי לשמור על פליטה יעילה, מרווח הפער האפקטיבי d בין מאיין לאספן חייב לגדול בערך פרופורציונלית ל- $p/1$. זה ניתן להשגה עם **מרווחי דיאלקטרי גמישים ומתנפחים** שמתרחבים מעט כשלחץ חיצוני יורד, או עם **מודולציה אלקטרונית** של גרדיאנטי פוטנציאל כדי לחקות פערים גדולים יותר.

כל לוח מדווח טלמטריה – זרם, מתח, ספירות קשת – למנהל מרכזי. אם לוח חווה קשת או התדרדרות, הוא כבה ומעוקף. העיצוב המודולרי אומר שאובדן לוחות בודדים בקושי משפיע על הדחף הכולל.

מציפה לדחף

הטיסה מתחילה בעדינות. בשיגור, ספינת האוויר עולה בצורה לסטרטוספירה. בעלייה, מערכת EAD פועלת במצב הספק נמוך, מספקת דחף קל לייצוב ושליטה בנדידה.

בגובה כ-30-40 ק"מ, שבו האוויר דליל אך עדיין מתנגש, מתחילה ההאצה העיקרית. ספינת האוויר מסתובבת בהדרגה לטיסה אופקית, מכוונת את צירה הארוך לכיוון התנועה המסלולית הרצויה.

בתחילה, הדחף מאוזן בין האצה אופקית והגברת נשיאה. הציפה הנותרת של הרכב מפצה על רוב משקלו; דחף EAD מספק רכיבים קדימה וקלות למעלה. כשהמהירות גדלה, הנשיאה הדינמית גדלה והציפה הופכת זניחה. המעבר חלק – אין "רגע המראה" כי ספינת האוויר מעולם לא ישבה על מסלול המראה.

העלייה השלושה-שבועית

שקול מסה נציגת רכב של $m = 2000 \text{ kg}$. להשגת מהירות מסלולית של $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ ב- $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$ (שלושה שבועות), הדחף הממוצע הנדרש הוא

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

שמונה ניוטון – משקל תפוז קטן – הוא הדחף הכולל הנדרש להגעה למסלול אם מיושם ברציפות לשלושה שבועות.

אם יחס T/P של המערכת הוא 0.03 N/W , טיפוסי לפעולת EAD יעילה בלחץ נמוך, אז ייצור 8.7 N דורש רק כ-290 W הספק. זה נראה מדהים קטן, ובפועל, הפסדי התנגדות נוספים יעלו את הדרישה לעשרות קילו-וואטים. אך פאנלים סולאריים המכסים כמה מאות מטרים רבועים יכולים לספק זאת בקלות.

נכלול גורם בטיחות של 100 לחוסר יעילות והתנגדות: כ-30 kW הספק חשמלי. עם 15% יעילות כוללת מאור שמש לדחף, הרכב חייב לקצור כ-200 kW אנרגיה סולארית. זה תואם כ-700 מטרים רבועים של שטח סולארי פעיל ביציאה של 300 W/m^2 – שטח קטן יותר ממגרש כדורגל, משולב בקלות על ספינת אוויר באורך 100 מטרים.

החשבון הפשוט הזה מדגים שהזרימת אנרגיה סבירה. מה שטילים משיגים בצפיפות הספק, ספינת האוויר משיגה בסבלנות ושטח.

התנגדות ומסדרון גובה גבוה

ההתנגדות נשארת המכל העיקרי לאנרגיה. כוח ההתנגדות הוא $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$, וההספק המקביל הוא $P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$.

ב-50 ק"מ, $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ אם $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, ו- $v = 1000 \text{ m/s}$, אז

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

זה 2.5 מגה-וואט – גבוה מדי. אך ב-70 ק"מ, שבו $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, אותה תצורה נותנת רק 25 kW הספק התנגדות. מכאן האסטרטגיה: **טפס תוך האצה**, נשאר על מסלול שבו ρv^3 נשאר קבוע בערך.

המסדרון האופטימלי הוא זה עם אוויר דליל בהדרגה, אולי גובה 40–80 ק"מ, שבו האטמוספירה מספקת בדיוק מספיק צפיפות ניטרלית לפעולת EAD אך מעט מספיק כדי לשמור על התנגדות ניתנת לניהול.

שליטה ברכב ויציבות

ללא מדחפים או זנבות, היציבות מגיעה מסימטריית שדה. הפעלה דיפרנציאלית של לוחות מספקת מומנט. אם הלוחות הקדמיים משמאל מייצרים מעט יותר דחף מאשר מימין, הרכב yaw בעדינות. שליטת pitch מושגת על ידי הטיית לוחות עליון ותחתון. מכיוון שהדחף ללוח קטן, התגובה איטית, אך הרכב פועל במשטר שבו זריזות אינה נחוצה.

חיישני תנוחה – גירוסקופים, מדי האצה, מעקבי כוכבים – מזינים מערכת שליטה דיגיטלית ששומרת על כיוון להקרנת שמש מקסימלית ומסלול טיסה נכון. הגודל העצום של הרכב ומשטר הטיסה האיטי הופכים אותו ליציב במיוחד.

בטיחות תרמית וחשמלית

פעולת EAD כוללת עשרות עד מאות קילו-וולטים בזרם נמוך. באוויר הדליל והיבש של הסטרטוספירה, הבידוד מתנהג אחרת: קשתות יכולות להתפשט מרחקים ארוכים על פני שטחים. עיצוב החשמלי של ספינת האוויר מטפל בכל המבנה כמערכת פוטנציאל מבוקרת. מסלולים מוליכים הם מיותרים, עם שכבות בידוד מפרידות תאי גז מקווי HV.

קשת אינה קטסטרופלית – היא נוטה להיות מקומית ועצמית-כבויה – אך יכולה לפגוע באלקטרודות. כל לוח מנטר את גל הזרם שלו; אם פליטה spike, המנהל מפחית מתח או מכבה את המודול הפגוע למספר שניות.

תרמית, היעדר קונוקציה אומר שכל חימום מקומי חייב להתפשט בהולכה לפאנלים קרינתיים. החומרים נבחרו ל-emissivity גבוהה וספיגה נמוכה באינפרא-אדום, מאפשרים לקרינה חום עודף לחלל.

סקיילביליות ומודולריות

המערכת סקייל על ידי אריחה, לא על ידי הגברת מתח. הכפלת מספר הלוחות מכפילה את הדחף; אין צורך בפליטות גדולות יותר. זה הופך את הארכיטקטורה ל-**סקיילבילית ליניארית** מדגמי מעבדה לרכבים מסלוליים.

פרוטוטיפ מעשי עשוי להתחיל כפלטפורמה קטנה ממולאת הלום עם עשרה מטרים רבועים של שטח EAD, מייצרת דחפים מילי-ניוטון המודדים בשעות. הדגמות גדולות יותר יוכלו להמשיך, כל אחת מתרחבת בשטח ובספק. הגרסה המסלולית הסופית עשויה להשתרע על מאות מטרים, עם אלפי לוחות נשלטים עצמאיים, פועלים תחת הספק סולארי מלא לחודשים.

מכיוון שכל הרכיבים הם מצב מוצק, למערכת יש חיי שירות ארוכים מובנים. אין יתדות טורבינה או מחזורי בעירה להתבלות – רק שחיקה הדרגתית של אלקטרודות והזדקנות חומרים. עם עיצוב קפדני, זמן ממוצע בין כשלים יכול להגיע לשנים.

פרופילי עלייה ומעברי גובה

המשימה המלאה ניתנת לדמיון כספירלה חלקה במישור (ρ, v) : כשהמהירות גדלה, הצפיפות יורדת. המסלול נבחר כך שהמוצר ρv^3 – הקובע הספק התנגדות – נשאר מתחת לסף שהמערכת הסולארית יכולה לספק.

1. עלייה צפה ל-30–40 ק"מ.

2. שלב האצה: שמירה על $P_D \approx 20\text{--}50 \text{ kW}$ בערך קבוע על ידי התאמת זווית וגובה.

3. מעבר למשטר מסלולי: מעל 70 ק"מ, נשיאה וציפה נעלמות, וספינת האוויר הופכת באופן אפקטיבי ללוויין עדיין מגרד את האטמוספירה.

המעבר מ"טיסה" ל"מסלול" אינו גבול חד. האטמוספירה דוהה בהדרגה; הדחף מפצה על התנגדות עד שההתנגדות מפסיקה להיות רלוונטית. מסלול הרכב הופך מעגלי במקום בליסטי, והוא נשאר בגובה ללא הגבלה.

איזון אנרגיה ועמידות

אינטגרציה על פני העלייה המלאה, הקלט האנרגיה הכולל מהשמש עצום בהשוואה לנדרש. אפילו בקצב איסוף צנוע של 100 kW, שלושה שבועות פעולה רציפה מצטברים

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

לרכב 2000 ק"ג, זה 90 MJ/kg – פי שלושה מדרישת האנרגיה הקינטית המסלולית. רוב האנרגיה הזו תאבד להתנגדות וחוסר יעילות, אך המרווח נדיב.

זו הקסם השקט של סבלנות סולארית: כאשר זמן מותר להימתח, שפע אנרגיה מחליף מחסור הספק.

תחזוקה, חזרה ושימוש חוזר

לאחר השלמת משימתו המסלולית, ספינת האוויר יכולה להאט בהדרגה על ידי היפוך קוטביות שדה EAD. ההתנגדות גדלה כשהיא יורדת; אותו מנגנון שהרים אותה פועל כעת כבלם. הרכב יכול להיכנס מחדש לסטרטוספירה ולצוף למטה תחת ציפה נותרת.

מכיוון שאין שלבים צורכים שמושלכים, המערכת ניתנת לשימוש חוזר לחלוטין. המעטפת ניתנת לתחזוקה, מילוי מחדש ושיגור מחדש. התחזוקה כוללת החלפת לוחות או סרטים מושחתים במקום בנייה מחדש של מנועים.

בניגוד לטילים כימיים, שבהם כל שיגור צורך מיכלים ודלק, ספינת האוויר EAD היא חללית מחזורת אנרגיה. השמש ממלאת אותה ברציפות; רק בלאי דורש התערבות אנושית.

המשמעות ההנדסית הרחבה יותר

אותן טכנולוגיות שאפשרות ספינת אוויר EAD סולארית – פוטו-וולטאים קלים, אלקטרוניקת הספק מתח גבוה, דיאלקטריקים סרט דק – יש להן יישומים ארציים מיידיים. פלטפורמות תקשורת סטרטוספריות, חיישני אקלים בגובה גבוה, ודרונים עמידים ארוכים כולם מרוויחים מאותם התפתחויות.

ברדיפה אחר מערכת שמגיעה למסלול ללא דלק, אנו ממציאים גם מחלקה חדשה של רכבים אוויריים מצב מוצק – מכונות שטסות לא בבעירה אלא במניפולציית שדה.

במובן זה, פרויקט Rise-Fly-Orbit נמצא בשרשרת שכוללת את Wright Flyer ואת הטילים הראשונים בדלק נוזלי: לא טכנולוגיה מושלמת, אלא **הוכחת עיקרון** שמשנה את משמעות "טיסה".

רגולציה, אסטרטגיה ופילוסופיית העלייה האיטית

הפיזיקה של ספינת אוויר אלקטרו-אווירודינמית סולארית היא מתירה; החוק אינו. חוקי הטיסה של היום מחלקים את השמיים לתחומים מוגבלים נקיים: **מרחב אווירי** המוסדר על ידי חוק תעופה, ו-**חלל חיצון** המוסדר על ידי חוק חלל. ביניהם נמצאת אזור אפור – גבוה מדי להסמכת מטוסים, נמוך מדי לרישום מסלולי. ספינת האוויר למסלול חיה בדיוק באזור הזה, נעה ברציפות דרך גבהים שבנייר שייכים לאף קטגוריה.

למה זה "בלתי אפשרי"

חוקי מרחב אווירי מניחים רכבים שממריאים ונוחתים בתוך שעות. הם דורשים מנועים מוסמכים, משטחי שליטה אווירודינמיים, ויכולת לוותר על תנועה. אף אחת מההנחות הללו אינה מתאימה לבלון אוטונומי סולארי שעשוי להישאר שבועות מעל 60 ק"מ.

תקנות רכבי שיגור מתחילות שם שטילים נדלקים: הצתה נפרדת, אתר שיגור, ומערכת סיום טיסה מתוכננת להכיל פיצוצים. ספינת האוויר שלנו אין אף אחד מהם. היא עולה לאט כמו ענן; אין רגע "שיגור". עם זאת, מכיוון שהיא בסופו של דבר תעבור את Mach 1 ותגיע למהירות מסלולית, היא נופלת תחת סמכות טיסות חלל. התוצאה פרדוקסלית: היא לא יכולה לטוס חוקית כמטוס, אך חייבת להיות מורשית כטיל שהיא לא דומה לו.

מחלקת רכב היברידי אטמוספרי-מסלולי

התרופה היא להכיר בקטגוריה חדשה – **רכב היברידי אטמוספרי-מסלולי (HAOV)**. מאפייני ההגדרה שלו יהיו:

- **חציית תחומים רציפה:** עלייה מפני השטח ליד-חלל ללא שלבים נפרדים.
- **זרימת אנרגיה קינטית נמוכה:** החלפת תנע כוללת עם האטמוספירה נמוכה בהרבה סדרי גודל מזו של טילים.
- **התנהגות בטוחה פסיבית:** באובדן הספק, הרכב נודד ויורד; הוא לא נופל בליסטית.
- **מעקב שיתופי:** תמיד נראה לרדאר ולחיישנים לווייניים, משדר את וקטור המצב שלו בדומה לטרנספונדרים ADS-B למטוסים.

מסגרת HAOV תאפשר הסמכה של רכבים כאלה תחת **קריטריונים מבוססי ביצועים** במקום **מבוססי חומרה** – הגדרת בטיחות במונחי שחרור אנרגיה, טביעת רגל קרקע, ויכולת ירידה אוטונומית במקום נוכחות מנועים או דלק.

מסדרונות ימיים או מדבריים ניתנים להגדרה שבהם HAOVs יכולים לפעול ברציפות, מנוטרים על ידי רשתות תנועה חלל קיימות. עלייתם תציב סיכון פחות לתעופה מבלון מזג אוויר בודד, אך חוקים נוכחיים אינם מציעים להם נתיב.

הפוליטיקה של סבלנות

רגולציה עוקבת אחר תרבות, ותרבות מכורה למהירות. אבני דרך אווירונאוטיות נמדדות ביחסי דחף-למשקל ובדקות למסלול. הרעיון של רכב שעשוי לקחת **שלושה שבועות** להגיע למסלול נשמע,

בשמיעה ראשונה, כמו בגרסיה. אבל סבלנות היא מחיר הקיימות. ספינת האוויר מציעה מדד שונה: לא "כמה מהר אנו יכולים לשרוף אנרגיה" אלא "כמה ברציפות אנו יכולים לצבור אותה".

לסוכנויות חלל רגילות לחלונות שיגור וספירות לאחר, רכב כזה דורש שינוי בפעולות: תכנון משימות לפי עונות במקום שניות; הכנסות מסלוליות התלויות בגיאומטריית אור שמש, לא בזמינות פלטפורמה. עם זאת, השינוי הזה תואם את הסיבוב הרחב יותר ל-**תשתית מצב יציב** – חלליות סולאריות-חשמליות, תחנות לשימוש חוזר, פלטפורמות אקלים מתמשכות.

ערך אסטרטגי

רכב סולארי-EAD לשימוש חוזר מציע יכולות שאף טיל או מטוס לא יכול להתאים:

- **תצפית ותקשורת מתמשכת בגובה גבוה:** לפני מסלול מלא, ספינת האוויר יכולה לרחף חודשים בסטרטוספירה העליונה, משדרת נתונים או מצלמת את כדור הארץ.
 - **הובלת מטען הדרגתית:** מטענים קטנים ניתנים להרמה בעדינות ללא ההלמות אקוסטיות ותרמיות של שיגור.
 - **אנלוגים פלנטריים:** על מאדים, שבו מהירות מסלולית היא רק 3.6 ק"מ/שנייה ולחץ אטמוספרי מקל על האצת יונים במסלולים ארוכים, אותה ארכיטקטורה יכולה לפעול אפילו טוב יותר.
 - **אפוטרופוס סביבתי:** ללא פליטות, ללא שפיכות דלק, השפעה אקוסטית זניחה.
- מבחינה כלכלית, HAOVs תפעוליים ראשונים לא יחליפו טילים אלא ישלימו אותם, משרתים נישות שבהן סבלנות המטען גוברת על דחיפות. מבחינה אסטרטגית, הם ינתקו גישה ליד-חלל משרשראות אספקת דלק – תכונה מושכת לסוכנויות חלל המחפשות תשתית בר-קיימא.

הנדסת ספר החוקים

יצירת קטגוריית HAOV פחות על לובינג ויותר על **מדידה**. רגולטורים סומכים על נתונים. הדרך קדימה היא שקיפות ניסויית:

1. **הדגמות מבוססות-הלום** במסדרונות מרוחקים, מצוידות להקלטת מסלול, שימוש באנרגיה, והתנהגות תקלה.
2. **טלמטריה רציפה** משותפת עם תעופה אזרחית ורשתות מעקב חלל כדי להוכיח דינמיקת טיסה צפויה.
3. **סימולציות ומודלי סיכון** המראים שהמקרה הגרוע ביותר של זרימת אנרגיה קינטית מעל אזורים מיושבים זניח.

ברגע שסוכנויות יראו ראיות כמותיות ש-HAOV לא יכול לפגוע במטוסים או באוכלוסיות קרקעיות, הארכיטקטורה החוקית תעקוב – כמו שעשתה לבלוני גובה ודרונים לפניו.

ממד אתי

טיסה איטית נושאת משקל מוסרי. שיגורים כימיים מזהמים לא בגלל חוסר זהירות של מהנדסים אלא כי הפיזיקה לא מציעה זמן למחזור החום שלהם. ספינת אוויר סולארית, לעומת זאת, אינה צורכת שום דבר בלתי ניתן להחזרה. היא מחליפה רעש בשקט, הבזק בהבהוב. עלייתה תהיה נראית מהקרקע כנקודה בהירה ולא ממהרת, חפץ אנושי עולה ללא אלימות.

בעידן הדחיפות, תנועה מכוונת כזו היא הצהרה: ששאיפה טכנולוגית אינה צריכה להיות נפיצה כדי להיות עמוקה.

סבלנות האור

כאשר טיל מגיע למסלול, הוא עושה זאת בהאצה גסה: שניות של בעירה שמשאירות את השמיים רועדים. ספינת האוויר האלקטרו-אווירודינמית מגיעה אחרת. כל פוטון שפוגע בעורה תורם לחישה של תנע, מתווך על ידי אלקטרונים, יונים, ומתמטיקה שקטה של משוואות מקסוול. על פני שלושה שבועות לחישה אלה מצטברות למסלול.

אותו ביטוי $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ – שמתאר מיקרו-אמפר נדידת יונים במעבדה, מנהל גם גוף נושא טון-אלף מחליק באטמוספירה העליונה. הסקאלה משתנה; העיקרון לא. טנסור מקסוול, חוק קולון, וסבלנות אור השמש הם אוניברסליים.

אם האנושות לומדת לנצל את הסבלנות הזו, אנו זוכים בדרך חדשה להשאיר את כדור הארץ – אחת שניתן לחזור עליה ללא הגבלה, מופעלת על ידי אותה כוכב שמזין אותנו.

לעבר עידן טיסה הפיכה

טכנולוגיית טילים כימית היא מחווה חד-כיוונית: מאמץ עצום להגיע למסלול, וסיום פתאומי בעלייה מחדש. ספינת האוויר האלקטרו-אווירודינמית מציעה **נתיב הפיך**. היא יכולה לעלות ולרדת ברצונה, לשהות בכל מקום מטרופוספירה למסלול. היא גם חללית וגם בית מגורים, רכב ותחנה.

באותה רציפות נמצאת היפוך פילוסופי: טיסת חלל לא כהפרדה אלא כהרחבת אטמוספירה. הגרדיאנט מאוויר לואקום הופך לשטח ניתן לניווט. רכבים כאלה יטשטשו את הגבול בין מטאורולוגיה לאסטרונאוטיקה, הופכים את "שולי החלל" למרחב עבודה חי במקום מחסום.

הרהורים סיום

אין צורך בפיזיקה חדשה – רק עמידות, דיוק ורגולציה מדומיינת מחדש. תקציב האנרגיה המסלולי ניתן לשלם באור שמש; הדחף יכול לנבוע משדות חשמליים הפועלים על יונים; הזמן ניתן להלוות מסבלנות המהנדסים.

המכשולים הם תרבותיים ובירוקרטיים: לשכנע סוכנויות שמשו שנראה כמו בלון יכול, דרך מתמטיקה והתמדה, להפוך ללוויין. עם זאת, כל טכנולוגיה טרנספורמטיבית התחילה כאנומליה בניירת.

כאשר הראשון מבין כלי השיט האלקטרו-אווירודינמיים הסולאריים הללו יעלה, התקדמותו תהיה כמעט בלתי מורגשת משעה לשעה. אך מיום ליום הוא יאסוף מהירות, עד שסופו של דבר יחליק מעבר להישג ידה של מזג האוויר. לא יהיה רעש – רק זמזום חלש, רציף של שדות והצטברות יציבה של אור שמש לתנועה.

זה יסמן את תחילת **גישה לשימוש חוזר, בר-קיימא ורך למסלול**: דרך לעלות, לטוס, ול-ללא הצתת גפרור – מסלול.

הפניות וקריאה נוספת

- **פרויקט Rise Fly Orbit:** <https://riseflyorbit.org> - סקירה של קונספט ספינת האוויר הסולארית-למסלול ומחקר קשור.
- **מאמר הנעה אלקטרו-אווירודינמית:** https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html - טיפול תיאורטי מעמיק בדחף אלקטרו-אווירודינמי באמצעות טנסור מתח מקסוול וניסוח כוח גוף קולון.

- Barrett, S. et al., **Nature** (2018). "Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion". - הדגמה ראשונה של מטוס כנפיים קבועים עם הנעה יונית מצב מוצק.
- 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 - להשוואה בתקציבי אנרגיה ושיקולים Δv .
- NASA Glenn Research Center, "Solar Electric Propulsion Basics". - רקע למערכות דחף חשמלי סולאריות בעלות יעילות גבוהה.