

# इलेक्ट्रोएरोडायनामिक प्रणोदन - मैक्सवेल और कूलॉम्ब द्वारा संचालित

इस निबंध में प्रस्तुत अंतर्दृष्टियाँ लेखक द्वारा 2016 से 2018 के बीच किए गए दर्जनों प्रयोगों से निकली हैं, जिनमें विभिन्न ऊर्जा स्रोतों (AC और DC), इलेक्ट्रोड ज्यामितियों और आयन उत्सर्जक प्रकारों के साथ इलेक्ट्रोएरोडायनामिक प्रणोदन की खोज की गई। इन जांचों का चरम 80 सेमी रोटार के निर्माण में हुआ, जो नीचे चित्रित है, जिसने 6 किलोवोल्ट से कम और केवल लगभग 100 मिलीवाट विद्युत इनपुट पावर का उपयोग करके 18 आरपीएम की घूर्णन गति हासिल की।

इस प्रयोगात्मक अभियान ने खुलासा किया कि प्रदर्शन हवा की गति या आयन धारा स्वयं से कहीं अधिक विद्युतस्थैतिक क्षेत्रों के वितरण और ज्यामिति पर निर्भर करता है। इन अवलोकनों ने इलेक्ट्रोएरोडायनामिक प्रणोदन के सैद्धांतिक पुनर्संरचना का आधार रखा जो आगे आता है।

## इलेक्ट्रोएरोडायनामिक प्रणोदन - शांत इंजन

इलेक्ट्रोएरोडायनामिक (EAD) प्रणोदन - अक्सर इलेक्ट्रोहाइड्रोडायनामिक (EHD) थ्रस्ट या “आयन हवा” कहा जाता है - उन दुर्लभ तकनीकों में से एक है जो विज्ञान कथा जैसी लगती है: एक उपकरण जो बिना चलते हुए भागों, बिना दहन और बिना दिखाई देने वाले निकास के हवा में चुपचाप चलता है। जनता ने पहली बार 2000 के दशक की शुरुआत में बैकयार्ड “लिफ्टर” परियोजनाओं के माध्यम से इसके बारे में सुना, और फिर 2018 में जब MIT ने एक “आयन विमान” को जिम्मेजियम के पार सरकते हुए प्रदर्शित किया।

फिर भी, अंतर्निहित भौतिकी का इतिहास लंबा और जटिल है। लगभग एक सदी पहले, थॉमस टाउन्सेंड ब्राउन और पॉल बीफेल्ड ने देखा कि उच्च-वोल्टेज कैपेसिटर छोटा लेकिन लगातार थ्रस्ट उत्पन्न कर सकते हैं। ब्राउन ने इस प्रभाव को “एंटीग्रेविटी” का श्रेय दिया। आधुनिक विज्ञान, मैक्सवेल और कूलॉम्ब के नियमों से लैस, मानता है कि सत्य अधिक सूक्ष्म है - और कई मायनों में, अधिक गहन।

EAD प्रणोदन आयनों से हवा उड़ाने के बारे में नहीं है। यह **विद्युत क्षेत्रों को आकार देने** के बारे में है ताकि परिणामी **विद्युतस्थैतिक तनाव** एक शुद्ध यांत्रिक बल उत्पन्न करें। इस अर्थ में, EAD उपकरण मैक्सवेल और कूलॉम्ब द्वारा संचालित हैं: विद्युत क्षेत्र की ज्यामिति और गतिशीलता द्वारा।

## आयन हवा का भ्रम

अधिकांश इंजीनियरों से EHD प्रणोदन के बारे में पूछें तो आप एक सरल कहानी सुनेंगे: एक तेज उत्सर्जक कोरोना डिस्चार्ज के माध्यम से आयन उत्पन्न करता है; ये आयन संग्राहक इलेक्ट्रोड की ओर त्वरित होते हैं, रास्ते में तटस्थ हवा के अणुओं से टकराते हैं और उन्हें गति हस्तांतरित करते हैं। तटस्थ गैस चलती है - कथित “आयन हवा” - और न्यूटन के तीसरे नियम द्वारा, उपकरण समान और विपरीत थ्रस्ट का अनुभव करता है।

यह चित्र गलत नहीं है, लेकिन यह अपूर्ण है।

व्यवहार में, आयनों का द्रव्यमान नगण्य होता है। उनके तटस्थों के साथ टकराव लगातार होते हैं, हाँ, लेकिन प्रत्येक टकराव में हस्तांतरित गति न्यूनतम होती है। इससे भी महत्वपूर्ण बात, **सुई की नोक या संग्राहक पर कोई महत्वपूर्ण यांत्रिक बल सीधे कार्य नहीं करता।** “हवा” प्रणोदन का उप-उत्पाद है, न कि स्रोत।

सच्चा इंजन उन आयनों को त्वरित करने वाले **विद्युत क्षेत्र** में निहित है - अंतरिक्ष आवेश के रूपाकारण और प्रवाह के रूप में विद्युतस्थैतिक ऊर्जा के पुनर्वितरण में।

## क्षेत्र दबाव और मैक्सवेल तनाव

मैक्सवेल के समीकरण वर्णन करते हैं कि विद्युत क्षेत्र **मैक्सवेल तनाव टेंसर** के माध्यम से गति कैसे संग्रहीत और स्थानांतरित करते हैं:

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

किसी भी शरीर की सतह पर इस टेंसर का एकीकरण उस पर कार्य करने वाले शुद्ध **विद्युतस्थैतिक दबाव** को देता है। यह दबाव - हवा की गति नहीं - EHD थ्रस्टर को आगे धकेलता है।

जब कोरोना डिस्चार्ज होता है, तो उत्सर्जक के चारों ओर आयनों का बादल बनता है। ये आयन दो महत्वपूर्ण चीजें करते हैं:

1. **वे उत्सर्जक के विद्युत क्षेत्र को आंशिक रूप से ढालते हैं।** नोक के पास स्थानीय क्षेत्र शक्ति गिर जाती है, लेकिन आसपास के आयतन में मजबूत बनी रहती है।
2. **वे समग्र क्षेत्र ज्यामिति को विकृत करते हैं।** उत्सर्जक के एक तरफ, क्षेत्र रेखाएँ निकटतम आवेशित सतहों या ग्राउंडेड संरचनाओं पर समाप्त होती हैं। दूसरी तरफ, वे बाहर की ओर विस्तारित होती हैं, आंशिक रूप से अंतरिक्ष आवेश द्वारा न्यूट्रलाइज्ड।

परिणाम उत्सर्जक-संग्राहक प्रणाली पर **विद्युतस्थैतिक दबाव में असंतुलन** है - एक शुद्ध बल। गति क्षेत्र से इलेक्ट्रोड की ओर बहती है, न कि आणविक टकरावों के माध्यम से।

## कूलॉम्ब का नियम कार्य में

सबसे सरल स्तर पर, शामिल बल कूलॉम्ब के नियम द्वारा वर्णित हैं:

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

EHD संरचना के प्रत्येक आवेशित सतह तत्व उसके वातावरण में प्रत्येक अन्य आवेशित क्षेत्र को आकर्षित या प्रतिकर्षित करता है। कुल थ्रस्ट इन असंख्य कूलॉम्बीय इंटरैक्शनों का वेक्टर योग है, जो चलते आयनों द्वारा लगातार पुनःआकारित होते हैं जो क्षेत्र को मॉड्युलेट करते हैं।

स्थिर-राज्य कोरोना में, उच्च-वोल्टेज उत्सर्जक और अपेक्षाकृत नकारात्मक संग्राहक (या आसपास का वातावरण) के बीच सकारात्मक आयनों की पतली परत बैठी होती है। ये आयन **मध्यस्थ** के रूप में कार्य करते हैं: वे उत्सर्जक और संग्राहक के बीच आकर्षण को आंशिक रूप से ढालते हैं, और गति से, क्षेत्र असममिति को लगातार रीसेट करते हैं। स्थिर विद्युत इनपुट उस असंतुलन को बनाए रखता है, विद्युतस्थैतिक विभव ऊर्जा को यांत्रिक बल में परिवर्तित करता है।

## नासा से सबक और आयन हवा पैराडाइम की सीमाएँ

2000 के दशक की शुरुआत में, नासा और उसके ठेकेदारों ने ग्रेविटेक और टैली AIAA अध्ययनों के तहत बीफेल्ड-ब्राउन प्रकार के उपकरणों की पुनःजांच की। वायुमंडलीय और वैक्यूम वातावरणों में उच्च-वोल्टेज असममित कैपेसिटर्स का उपयोग करके, प्रयोग हवा की अनुपस्थिति में प्रभाव के बने रहने का परीक्षण करने के लिए थे।

परिणाम असंदिग्ध थे - और अनजाने में खुलासा करने वाले।

वायुमंडलीय मोड में, रोटर्स ने मुश्किल से मापनीय घूर्णन (1-2 आरपीएम) और 10-100  $\mu\text{N}$  रेंज में थ्रस्ट हासिल किया - यदि उपकरण वास्तव में गुरुत्वाकर्षण प्रभाव का लाभ उठा रहे होते तो अपेक्षित से कई गुना कम। गति पूरी तरह से पारंपरिक कोरोना डिस्चार्ज और कमजोर आयन हवा को जिम्मेदार ठहराई गई।

वैक्यूम में,  $10^{-6}$  Torr तक दबावों पर, गति पूरी तरह से रुक गई। कोई भी क्षणिक संकेत आउटगैसिंग या अवशिष्ट सतह आवेश को ट्रेस किया गया। आयनाइजेशन को बनाए रखने के लिए हवा के अणुओं के बिना, विद्युतस्थैतिक क्षेत्र सममित हो गया, और बल गायब हो गया।

जांचकर्ताओं ने निष्कर्ष निकाला कि थ्रस्ट हवा की घनत्व के साथ लगभग रैखिक रूप से स्केल करता है - एक निष्कर्ष जो अक्सर EHD प्रणोदन को वैक्यूम असंभव के रूप में "खंडन" करने के लिए उद्धृत किया जाता है। लेकिन यह वास्तव में कुछ गहरा प्रदर्शित करता था: **अंतरिक्ष आवेश को ले जाने वाले माध्यम के बिना, विद्युत क्षेत्र विद्युतस्थैतिक दबाव ग्रेडिएंट्स उत्पन्न करने वाली असममिति खो देता है।**

अन्य शब्दों में, वे प्रारंभिक परीक्षणों ने दुर्घटना से **मैक्सवेल-तनाव व्याख्या** की पुष्टि की इलेक्ट्रोएरोडायनामिक प्रणोदन की। यह गुरुत्वाकर्षण नहीं था, न ही मात्र आयन ड्रैग - यह **आवेश-मध्यस्थ क्षेत्र असंतुलन** की उपस्थिति थी जो मायने रखती थी।

ग्रेविटेक उपकरण, सरलता और सममिति के लिए बनाए गए, किसी भी महत्वपूर्ण **आवेश भंडार** या **क्षेत्र-आकारक डाइलेक्ट्रिक** की कमी थी। उनकी खुली ज्यामितियाँ क्षेत्र रेखाओं को आसपास में फैला देती थीं, अधिकांश विद्युतस्थैतिक ऊर्जा बर्बाद कर देती थीं।

इसके विपरीत, यहां वर्णित EPS-एल्यूमिनियम रोटर ने एक अच्छी तरह से परिभाषित चालक त्वचा के साथ आवेश को केंद्रित किया, स्थानीय क्षेत्र को **आकार** देने की अनुमति दी अंतरिक्ष आवेश क्षेत्र द्वारा। परिणाम: 6 किलोवोल्ट से कम और लगभग 100 मिलीवाट पर उपयोगी थ्रस्ट - ऊर्जा दक्षता में लगभग दो गुना बेहतर प्रदर्शन।

ये निष्कर्ष एक सुसंगत थीम को प्रतिध्वनित करते हैं: **इलेक्ट्रोएरोडायनामिक दक्षता वोल्टेज या हवा प्रवाह से नहीं, बल्कि आवेश टोपोलॉजी और क्षेत्र ज्यामिति के नियंत्रण से उभरती है।**

## आवेश-भंडार प्रभाव

कठोर, इन्सुलेटिंग कोर पर हल्की फॉयल केवल एक चालक के रूप में व्यवहार नहीं करती - यह **बड़ी सतह क्षेत्र आवेश भंडार** बनाती है जो विद्युत क्षेत्र की असममिति को बढ़ाती है। वर्तमान डिजाइन में, विस्तारित पॉलीस्टाइरीन (EPS) शुद्ध रूप से **हल्का संरचनात्मक समर्थन** के रूप में कार्य करता है, जिसकी पूरी सतह एल्यूमिनियम फॉयल से लिपटी हुई है जो **उच्च-वोल्टेज आपूर्ति के साथ विद्युत रूप से निरंतर** है। EPS नगण्य विद्युत कार्य जोड़ता है; इसका मूल्य न्यूनतम द्रव्यमान पर बड़ी चालक सतह सक्षम करने में निहित है।

यह विस्तृत चालक त्वचा सीधे पावर सप्लाई से आवेश संग्रहीत करती है, कोरोना डिस्चार्ज को प्रत्येक चक्र में शून्य से निर्माण करने के बजाय **पूर्व-आवेशित विद्युतस्थैतिक क्षेत्र** के खिलाफ संचालित करने की अनुमति देती है। फॉयल का उच्च सतह क्षेत्र प्रभावी कैपेसिटेंस को नाटकीय रूप से बढ़ाता है -  $10\text{--}100\text{ pF cm}^{-2}$  के क्रम पर, सतह बनावट और वक्रता पर निर्भर - और एक संयत लागू वोल्टेज को बहुत मजबूत स्थानीय विद्युत-क्षेत्र ग्रेडिएंट में परिवर्तित करता है।

जब कोरोना प्रज्वलित होता है, तो फॉयल स्थिर करने वाली विभव संदर्भ के रूप में कार्य करती है। उत्सर्जित आयन स्थानीय क्षेत्र को थोड़ा मॉड्युलेट करते हैं लेकिन इसे हावी नहीं होते; इसके बजाय, संग्रहीत सतह आवेश एक स्थिर असममिति बनाए रखता है जो बहुत कम पावर पर निरंतर थ्रस्ट उत्पन्न करता है।

मैक्सवेल-तनाव दृष्टिकोण से, बल क्षेत्र शक्ति और उसके ग्रेडिएंट के एकीकरण के समानुपाती है:

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

और बड़ा, अच्छी तरह से आवेशित फॉयल दोनों शब्दों को अधिक वोल्टेज या उच्च धारा की आवश्यकता के बिना अधिकतम करती है। यह स्पष्ट करता है कि कम-पावर, कम-वोल्टेज रोटर महत्वपूर्ण घूर्णन क्यों हासिल कर सका: इसने पारंपरिक "आयन-हवा" ज्यामितियों के भारी आयन धारा हानियों के लिए **संग्रहीत विद्युतस्थैतिक ऊर्जा** को प्रतिस्थापित किया - **विद्युतस्थैतिक दक्षता** का एक व्यावहारिक रूप।

# दक्षता की ज्यामिति

EHD थ्रस्टर की दक्षता हवा प्रवाह गति द्वारा निर्धारित नहीं होती, बल्कि **विद्युत क्षेत्र को आकार देने की प्रभावशीलता** द्वारा। कुंजी पैरामीटरों में शामिल हैं:

- **क्षेत्र असममिति:** विद्युतस्थैतिक दबाव ग्रेडिएंट का शुद्ध दिशात्मक घटक।
- **आवेश घनत्व वितरण:** आयन बादल आंशिक ढाल के माध्यम से उस क्षेत्र को कैसे संशोधित करता है।
- **कैपेसिटिव कपलिंग:** लागू वोल्ट प्रति सामना सतहों पर संग्रहीत कुल आवेश।
- **हानि चैनल:** कोरोना हानियाँ, पुनर्संयोजन, और डाइलेक्ट्रिक रिसाव।

डिजाइन जो क्षेत्र को कैद और आकार देते हैं - उदाहरण के लिए, उत्सर्जक के पास एक व्यापक, विपरीत आवेशित सतह रखकर - वाट प्रति थ्रस्ट में आदेशों के गुणक सुधार प्राप्त कर सकते हैं। विद्युत क्षेत्र कार्य करता है; आयन केवल क्षेत्र को असममित और गतिशील रखने में सक्षम बनाते हैं।

## बीफेल्ड-ब्राउन का पुनर्मूल्यांकन

ब्राउन के असममित कैपेसिटर्स से थ्रस्ट के प्रारंभिक अवलोकन आधुनिक प्लाज्मा भौतिकी की हमारी समझ से पहले के हैं। मैक्सवेल तनाव या अंतरिक्ष-आवेश गतिशीलता के ढांचे के बिना, यह सोचना स्वाभाविक था कि प्रभाव गुरुत्वाकर्षण को शामिल कर सकता है। EHD थ्रस्टरों द्वारा क्षेत्र वेक्टर “के विरुद्ध” बल उत्पन्न करने (और कभी-कभी ऊर्ध्वाधर ऊपर) का तथ्य केवल रहस्य को गहरा कर देता था।

आज के लेंस के माध्यम से देखा गया, ब्राउन की “एंटीग्रेविटी” केवल विद्युतस्थैतिक दबाव को दृश्यमान बनाना था। गणितीय रूप में समानता - दोनों गुरुत्वाकर्षण और विद्युतस्थैतिक विभव ऊर्जाएँ  $1/r^2$  के रूप में गिरती हैं - भ्रम को ऐतिहासिक रूप से समझने योग्य बनाती है, लेकिन भौतिकी पूरी तरह से विद्युतचुंबकीय है।

## दृष्टिकोण और आधुनिक संदर्भ

हाल की विश्लेषण और साथी चर्चाएँ इलेक्ट्रोएरोडायनामिक प्रणोदन को **क्षेत्र-ग्रेडिएंट घटना** के रूप में पुनर्संरचना को मजबूत करती हैं न कि आयन-हवा इंजन के रूप में। क्लासिक लिफ्टर कॉन्फिगरेशन में, दसियों किलोवोल्ट पर मिलीएम्पियर के क्रम की कोरोना धाराएँ वाट प्रति माइक्रो- से मिली-न्यूटन रेंज में थ्रस्ट घनताएँ उत्पन्न करती हैं - विद्युत-क्षेत्र ऊर्जा का कितना कम निर्देशित यांत्रिक तनाव में समाप्त होता है इसका प्रतिबिंब। इसके विपरीत, फॉयल-लिफ्टा EPS रोटर उसी भौतिक नियम को **आवेश-चालित** प्रक्रिया में परिवर्तित करता है: व्यापक चालक सतह न्यूनतम धारा के साथ मजबूत  $E$ -ग्रेडिएंट बनाए रखती है, ड्रिफ्ट हानियों को संग्रहीत-क्षेत्र ऊर्जा के लिए व्यापार करती है।

यह भेद समकालीन अनुसंधान में व्यापक बदलाव को प्रतिध्वनित करता है। **डाइलेक्ट्रिक-बैरियर डिस्चार्ज एक्ट्यूएटर्स** एरोडायनामिक नियंत्रण में मैक्सवेल तनाव से अपनी सतह बल प्राप्त करते हैं न कि बल्क हवा प्रवाह से, जब इलेक्ट्रोड ज्यामिति असममिति के लिए ट्यून की जाती है तो 10–100 N kW<sup>-1</sup> दक्षताएँ प्राप्त करते हैं। **फ्लोटिंग-इलेक्ट्रोड और कैद ज्यामितियाँ** ONERA में और EU EHD कार्यक्रमों में अध्ययनाधीन आयन शीथ को आकार देकर थ्रस्ट में दो- से पाँच-गुना बढ़ोतरी दिखाती हैं - ठीक आवेश-भंडार रोटर के डिजाइन तर्क। और **पतली-हवा वातावरणों** में, जैसे ऊपरी स्ट्रेटोस्फियर या मंगल वातावरण, जहाँ आयन ड्रैग कमजोर होता है लेकिन विद्युतस्थैतिक तनाव बना रहता है, आवेश-समृद्ध सतहें पारंपरिक डिजाइनों की विफलता के बाद लंबे समय तक प्रणोदन बनाए रख सकती हैं।

भौतिकी क्लासिकल विद्युतचुंबकत्व के पॉइंटिंग-गति ढांचे से सुंदरतापूर्वक संरेखित होती है: थ्रस्ट क्षेत्र-ऊर्जा घनत्व के ग्रेडिएंट से मेल खाता है,

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

इसका अर्थ है कि प्रणाली विद्युतचुंबकीय क्षेत्र से सीधे गति खींचती है। आयन असंतुलन बनाए रखने वाले उत्प्रेरक हैं, न कि प्रतिक्रिया द्रव्यमान स्वयं। यह स्पष्ट करता है कि वैक्यूम प्रयोगों में जहाँ क्षेत्र सममित हो जाता है, थ्रस्ट क्यों गायब हो जाता है -  $\nabla E$  शब्द ढह जाता है। इसके विपरीत, फॉयल-भंडार रोटार में, कैपेसिटिव त्वचा  $E$  को तीव्र और दिशात्मक रखती है, केवल 100 mW इनपुट पावर से लगभग **0.1–1 mN** टॉर्क-समकक्ष थ्रस्ट उत्पन्न करती है - आयन-ड्रैग उपकरणों की दक्षता से 10–100 गुना।

पैरामीटर	पारंपरिक आयन-हवा डिजाइन	फॉयल आवेश-भंडार रोटार	निहितार्थ
वोल्टेज	20–50 kV	< 6 kV	कम ब्रेकडाउन जोखिम, आसान स्केलिंग
पावर	1–10 W	$\approx 0.1$ W	10–100× उच्च थ्रस्ट / W
थ्रस्ट तंत्र	आयन-तटस्थ टकराव	क्षेत्र ग्रेडिएंट (मैक्सवेल तनाव)	हवा घनत्व पर बड़े पैमाने पर स्वतंत्र
कुंजी इनेबलर	उत्सर्जक-संग्राहक गैप	कैपेसिटिव फॉयल भंडार	संग्रहीत आवेश > क्षणिक धारा
दक्षता ( $\text{N kW}^{-1}$ )	0.01–0.1	1–10 (अनुमानित)	माइक्रो-UAV के लिए संभव

ऐसी तुलनाएँ एक वैचारिक मोड़ को उजागर करती हैं: **धारा-चालित से आवेश-चालित प्रणोदन**, पदार्थ की गति से क्षेत्रों को आकार देने तक। अगली सीमा को **विद्युतस्थैतिक वास्तुकला** कहा जा सकता है - कम्प्यूटेशनल अनुकूलन और उन्नत सामग्रियों (कार्बन-नैनोट्यूब उत्सर्जक, पैटर्न फॉयल, मेटामटेरियल डाइलेक्ट्रिक) का उपयोग  $\int E \cdot \nabla E$  को अधिकतम करने के लिए। हाइब्रिड पल्स-DC मोड क्षणिक आवेश संग्रहण का और अधिक शोषण कर सकते हैं जबकि रासायनिक उप-उत्पादों को कम करते हैं।

## निष्कर्ष - मैक्सवेल और कूलॉम्ब द्वारा संचालित

इलेक्ट्रोएरोडायनामिक प्रणोदन एक विदेशी जिज्ञासा या छद्म-वैज्ञानिक विसंगति नहीं है। यह मैक्सवेल और कूलॉम्ब के नियमों का सीधा प्रकटीकरण है - एक मैक्रोस्कोपिक मशीन जो नियंत्रित क्षेत्र असममिति के माध्यम से विद्युतस्थैतिक विभव ऊर्जा को गति में परिवर्तित करती है।

जहाँ प्रारंभिक आविष्कारक “एंटीग्रेविटी” देखते थे और आधुनिक परियोजनाएँ “आयन हवा” देखती हैं, वास्तविक कहानी सरल और गहरी है: **विद्युत क्षेत्रों में तनाव होता है**। उस तनाव को आकार दें, और आप बिना चलते भागों, बिना ईंधन और बिना ध्वनि के हवा के माध्यम से खुद को खींच सकते हैं।

यह इलेक्ट्रोएरोडायनामिक प्रणोदन का शांत प्रतिभा है - वास्तव में, **मैक्सवेल और कूलॉम्ब द्वारा संचालित**।

## संदर्भ

1. Talley, C. et al. **बीफेल्ड-ब्राउन प्रभाव का मूल्यांकन: वैक्यूम और वातावरण में असममित कैपेसिटर थ्रस्ट परीक्षण**। AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. **इलेक्ट्रोकाइनेटिक उपकरण**। U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. **ठोस-राज्य आयन प्रणोदन के साथ विमान की उड़ान**। *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. **गैर-थर्मल प्लाज्मा एक्ट्यूएटर्स द्वारा हवा प्रवाह नियंत्रण**। *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. **EHD प्रवाह नियंत्रण और प्लाज्मा एक्ट्यूएटर्स**। NASA Technical Reports Server, 2015.
6. ONERA EHD कार्यक्रम: **इलेक्ट्रोहाइड्रोडायनामिक प्रणोदन और प्रवाह नियंत्रण**। आंतरिक रिपोर्ट 2018–2023.