

StarRoad परियोजना: पृथ्वी से अंतरिक्ष तक अतिभारी विद्युतचुंबकीय प्रक्षेपण गलियारा

विषय-सूची

नेविगेशन: [आरंभ](#) | [विषय-सूची](#) | [अंत](#)

- [1. विवरण, मुख्य विशेषताएँ, क्षमताएँ और दर्शन](#)
 - [1.1. परियोजना का मूल दर्शन](#)
 - [1.2. क्षमताएँ](#)
- [2. तकनीकी, आर्थिक, भौगोलिक और रणनीतिक लाभ तथा आधार](#)
 - [2.1. तकनीकी](#)
 - [2.2. आर्थिक](#)
 - [2.3. भौगोलिक](#)
 - [2.4. रणनीतिक](#)
- [3. औद्योगिक और तकनीकी आधार](#)
 - [3.1. चुंबकीय उत्तोलन और त्वरण \(मैग्लेव\)](#)
 - [3.2. अतिचालक तकनीक और वितरित संरचना](#)
 - [3.3. स्पंदित ऊर्जा](#)
 - [3.4. निर्वात प्रौद्योगिकी](#)
 - [3.5. अतिध्वनिक वायुगतिकी और तापीय सुरक्षा](#)
 - [3.6. नाभिकीय ऊर्जा प्रणालियाँ](#)
 - [3.7. सुरंग निर्माण](#)
 - [3.8. स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली](#)
 - [3.9. पराध्वनिक दहन](#)
 - [3.10. पोर्टल का बंद ईंधन चक्र](#)
 - [3.11. तकनीक सत्यापन रणनीति](#)
- [4. StarRoad के घटकों और तकनीकों का चरणबद्ध विस्तृत विवरण](#)
 - [4.1. त्वरण सुरंग और उसकी अवसंरचना](#)
 - [4.2. वायुमंडलीय प्रवेश-द्वार \(ऊँचाई पर स्थित टर्मिनल\)](#)
 - [4.3. शटल \(AstroLiner\)](#)
- [5. प्रक्षेपण तैयारी से उतरने के बाद रखरखाव तक संचालन चक्र](#)
 - [5.1. तैयारी और प्रक्षेपण](#)
 - [5.2. सुरंग में त्वरण](#)
 - [5.3. वायुमंडलीय प्रवेश-द्वार से निकास](#)
 - [5.4. वायुमंडल का पारगमन](#)
 - [5.5. अंतरिक्ष में प्रवेश और कक्षीय संचालन](#)
 - [5.6. कक्षा से बाहर निकलना और वापसी](#)
 - [5.7. समुद्र में अवतरण](#)
 - [5.8. खींचकर लाना और रखरखाव](#)
- [6. कार्यान्वयन, समय-सारणी, आवश्यकताएँ और औद्योगिक केंद्र](#)
 - [6.1. परियोजना के चरण](#)
 - [6.2. औद्योगिक केंद्र](#)
 - [6.3. समग्र समय-सीमा](#)
- [7. संबोधित समस्याएँ और कार्य](#)
 - [7.1. वैश्विक अतितापन](#)
 - [7.2. आर्थिक कार्य](#)
 - [7.3. रणनीतिक उद्देश्य](#)
 - [7.4. प्रौद्योगिकी उत्प्रेरक](#)

- [7.5. ऊर्जा और तापीय स्वायत्तता](#)
- [7.6. कार्बन पदचिह्न](#)
- [7.7. जल-तापीय मुख्य नहर की सामाजिक और पर्यावरणीय क्षमता](#)
- [7.8. ऊर्जा नेटवर्क](#)
- [7.9. आर्थिक धमनी के रूप में StarRoad](#)
- [7.10. महत्वपूर्ण अवसंरचना की सुरक्षा](#)
- [7.11. स्थल चयन और विस्तार क्षमता](#)
- [7.12. महाद्वीपीय परियोजना का राजनीतिक और कानूनी समन्वय](#)
- [7.13. माल प्रवाह का क्रमिक विकास](#)
- [8. बाज़ार और कक्षीय रसद](#)
 - [8.1. अतिभारी प्रक्षेपणों की माँग का प्रश्न](#)
 - [8.2. आरंभिक बाज़ार: अंतरिक्ष सौर ऊर्जा और कक्षीय डेटा केंद्र](#)
 - [8.3. अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा का जलवायु और औद्योगिक औचित्य](#)
 - [8.4. कक्षीय स्थान: GEO और EML4/5](#)
 - [8.5. आरंभिक चरण: AstroLiner-S की सीधी उड़ानें](#)
 - [8.6. परिपक्व चरण: माइक्रोवेव रिले और सेवा अवसंरचना](#)
 - [8.7. कार्य-परिवेश के अनुसार परिवहन का विभाजन](#)
 - [8.8. परिपक्व रसद में AstroLiner की भूमिका](#)
 - [8.9. अंतरकक्षीय परिवहन और टग](#)
 - [8.10. पृथ्वी और अन्य ग्रहों पर अवतरण](#)
 - [8.11. मानकीकृत मॉड्यूल](#)
 - [8.12. कक्षीय अवसंरचना का पदानुक्रम](#)
 - [8.13. कक्षीय शिपयार्ड](#)
 - [8.14. कक्षीय और चंद्र बस्तियाँ](#)
 - [8.15. रसद उपमा: समुद्री नेटवर्क जैसा अंतरिक्ष](#)
 - [8.16. माल प्रवाह का अर्थशास्त्र](#)
 - [8.17. बाज़ार और रसद विकास के चरण](#)
 - [8.18. विकास की संभावना: StarRoad का उत्तराधिकारी](#)
 - [8.19. ग्रहीय अभियांत्रिकी की क्षमता: एक संसाधन प्रणाली के रूप में सौरमंडल](#)
 - [8.20. रणनीतिक निष्कर्ष](#)
- [9. परियोजना का आर्थिक मॉडल](#)
 - [9.1. पद्धति और प्रमुख मान्यताएँ](#)
 - [9.2. अफ्रीकी परिस्थितियों में खुदाई की लागत](#)
 - [9.3. आंतरिक उत्पादन वाली सुरंग-खोदक मशीनों का बेड़ा](#)
 - [9.4. स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली](#)
 - [9.5. ऊर्जा भंडारण प्रणाली](#)
 - [9.6. औद्योगिक केंद्र और लॉजिस्टिक्स](#)
 - [9.7. अनुसंधान एवं विकास और प्रोटोटाइप — चरण 0](#)
 - [9.8. अंतिम CAPEX सारांश](#)
 - [9.9. चरणवार वितरण \(अरब USD\)](#)
 - [9.10. निवेश-वसूली और परिवहन लागत का विकास](#)
 - [9.11. विकल्पों से तुलना](#)
 - [9.12. आर्थिक निष्कर्ष](#)
- [10. सुरक्षा और आपात संचालन विधियाँ](#)
 - [10.1. सुरक्षा का सिद्धांत: कोई भी एकल विफलता घातक न बने](#)
 - [10.2. मुख्य जोखिम और उनसे सुरक्षा](#)
 - [10.3. आपातकालीन प्रोटोकॉल का क्रम](#)
 - [10.4. संरचनात्मक उत्तरजीविता के उपाय](#)

1. विवरण, मुख्य विशेषताएँ, क्षमताएँ और दर्शन

StarRoad पृथ्वी से अंतरिक्ष तक लंबी दूरी की मुख्य परिवहन प्रणाली है, जिसका केंद्र 2,050 किमी से अधिक लंबा निर्वात चुंबकीय-उत्तोलन त्वरक है। इसे यान पर प्रतिक्रियाशील प्रक्षेपण प्रणोदक ढोए बिना, 15,000 टन तक के स्वायत्त, पुनःप्रयोग योग्य अतिभारी शटल को अंतरिक्ष में भेजने के लिए बनाया गया है।

1.1. परियोजना का मूल दर्शन

अंतरिक्ष प्रक्षेपण प्रतिमान में परिवर्तन:

- **वायुमंडल का जड़त्वीय** पारगमन। StarRoad वायुमंडल को प्रणोद और वायुगतिकीय दक्षता से पार करने के बजाय, निर्वात में लगभग 11 किमी/सेकंड के अतिध्वनिक वेग तक त्वरित शटल के द्रव्यमान में संचित गतिज ऊर्जा का उपयोग करता है। पूरा वायुमंडल 50–60 सेकंड में जड़त्व के सहारे पार किया जाता है।
- **द्रव्यमान एक लाभ।** हजारों टन का बड़ा द्रव्यमान शत्रु नहीं रहता, बल्कि विशाल गतिज ऊर्जा का वाहक बनता है; साथ ही संरचना और तापीय सुरक्षा में अत्यधिक मजबूत तथा दुर्दम्य सामग्री का उपयोग संभव करता है।
- **कार्यों का विभाजन।** ऊर्जा अवसंरचना, त्वरण और सूक्ष्म नियंत्रण जमीनी परिसर को सौंपे जाते हैं और स्थिर अभियांत्रिकी प्रणाली बनते हैं। शटल माल ढुलाई, कक्षीय चालों और वापसी के लिए अनुकूलित विशेष परिवहन मॉड्यूल बन जाता है।
- **विस्तार योग्य औद्योगिकीकरण।** प्रणाली को एक अकेली सुविधा नहीं, बल्कि अंतरिक्ष 'रेलमार्ग' की पहली लाइन माना गया है, जिसमें समानांतर, अतिरिक्त और वैकल्पिक सुरंगें बन सकती हैं; इससे क्षमता घातांकीय रूप से बढ़ती और लागत घटती है।

1.2. क्षमताएँ

- **भूस्थिर कक्षा (GEO) से आगे सीधी आपूर्ति।** लगभग 11 किमी/सेकंड के प्रारंभिक वेग में पृथ्वी के भूमध्यरेखीय घूर्णन से करीब 0.465 किमी/सेकंड जुड़ने पर शटल पृथ्वी-सूर्य या पृथ्वी-चंद्रमा के L1/L2 लाग्रान्ज बिंदुओं जैसे उच्च-ऊर्जा गंतव्यों तक न्यूनतम सुधार के साथ लगभग सीधे पहुँच सकता है। इससे निम्न पृथ्वी कक्षा में खींचने और पुनःईंधन की आवश्यकता समाप्त होती है।
- **वहन क्षमता।** एक उड़ान में हजारों टन पहुँचाए जा सकते हैं। इससे गीगावाट-श्रेणी के कक्षीय विद्युत संयंत्र, अंतरिक्ष बस्तियाँ, संसाधन निष्कर्षण, प्रसंस्करण, संयोजन और उत्पादन परिसर, ग्रह रक्षा प्रणालियाँ तथा अंतरग्रहीय अंतरिक्षयान बनाना आर्थिक रूप से संभव होता है।
- **लागत।** पूर्ण उपयोग पर ऊँची कक्षाओं तक अनुमानित आपूर्ति लागत \$1–10 प्रति किलोग्राम तक गिर सकती है—मौजूदा और भावी रॉकेट प्रणालियों से कई परिमाण कम।

2. तकनीकी, आर्थिक, भौगोलिक और रणनीतिक लाभ तथा आधार

2.1. तकनीकी

अधिकांश वैकल्पिक कक्षीय प्रक्षेपण अवधारणाएँ इस बात से नहीं रुकती कि उन्हें सिद्धांततः बनाया जा सकता है या नहीं, बल्कि उनकी संचालन माँगों से रुकती हैं: निरंतर संचालन, सक्रिय गतिशील सहारा, अवास्तविक रूप से ऊँची विश्वसनीयता और विफलता के विनाशकारी परिणाम। सक्रिय गतिज महा-संरचनाओं को चालू रहने के लिए निर्बाध बिजली और लगातार गतिशील स्थिरीकरण चाहिए; बिजली या नियंत्रण जाने पर संरचना सहारा खो देती है और संभावित विनाशकारी विफलता अवस्था में चली जाती है। लंबी बाहरी निर्वात-नली प्रणालियाँ भी सीलिंग, खंड अलगाव और तापीय स्थिरता की अत्यंत कठिन माँगें रखती हैं। StarRoad अलग है क्योंकि इसकी महत्वपूर्ण अवसंरचना भूमिगत है, स्पंदित संचालन स्वीकारती है, दुर्घटना को स्थानीय बनाती है और निष्क्रिय रूप से स्थिर रहती है। इससे यह पृथ्वी से आगे माल ले जाने वाली मुख्य प्रणाली का न्यूनतम व्यवहार्य रूप बनता है। निर्वात परिवहन, अतिध्वनिक वायुगतिकी, स्पंदित शक्ति और अतिचालक जैसी वास्तविक तकनीकों को StarRoad के पैमाने पर अपनाना भी दृष्टिकोण को यथार्थवादी बनाता है।

2.2. आर्थिक

मुख्य लागत पूंजी निर्माण और ऊर्जा है। खर्च होने वाले चरण न होने तथा प्रक्षेपण में कार्य-द्रव की नगण्य खपत से संचालन लागत बहुत घटती है। परियोजना क्षेत्रीय विकास, नई ऊर्जा प्रणालियों और उच्च-तकनीक समूहों को भी बढ़ावा देती है।

StarRoad की आर्थिक व्यवहार्यता का आकलन करते समय विश्व परिवहन और ऊर्जा अवसंरचना का पैमाना देखना चाहिए। वार्षिक वैश्विक माल प्रवाह में कई मिलियन टन बहुत छोटा हिस्सा है, जबकि सैकड़ों अरब डॉलर का पूंजी निवेश ग्रह-स्तरीय अवसंरचना के लिए सामान्य है। इसलिए StarRoad मौजूदा परिवहन प्रणालियों से प्रतिस्पर्धा नहीं करता; वह एक उच्च-ऊर्जा गलियारे का क्षेत्र भरता है जो कुल वैश्विक माल प्रवाह को अपेक्षाकृत कम प्रभावित करते हुए नई क्षमताएँ जोड़ता है।

2.3. भौगोलिक

गैबॉन में न्यांगा नदी के मुहाने से कांगो लोकतांत्रिक गणराज्य के मोही पर्वत और दक्षिणी पठार तक का मार्ग लगभग आदर्श है:

- **भूमध्य रेखा।** पृथ्वी के घूर्णन से अधिकतम वेग लाभ और कक्षीय झुकाव का न्यूनतम सुधार।
- **सीधी दृष्टि।** मध्य अफ्रीका के विरल आबादी वाले क्षेत्रों से गुजरता अपेक्षाकृत सीधा मार्ग।
- **प्रवेश-द्वार की ऊँचाई।** 3,400 मीटर की ऊँचाई निकास पर वायुमंडलीय घनत्व 30% घटाती है और तापीय तथा आघात भार कम करती है।
- **भूकंपीय स्थिरता।** इस क्षेत्र में पूर्वी अफ्रीकी दरार की गतिविधि न्यूनतम है।
- **रसद।** मार्ग उत्पादन और शटल वापसी के लिए समुद्र से शुरू होता है और ऊँचाई पर समाप्त होता है।

- **इष्टतम मार्ग और स्थान:** गैबॉन में न्यांगा नदी के मुहाने से कांगो लोकतांत्रिक गणराज्य के मोही पर्वत तक लगभग 2,050 किमी। गैबॉन के तट से प्रक्षेपण लगभग 3° का करीब-करीब आदर्श भूमध्यरेखीय कक्षीय झुकाव देता है, जिससे भूस्थिर कक्षा और लाग्रांज बिंदुओं तक सीधी पहुँच मिलती है तथा अंतरग्रहीय अंतरण लागत न्यूनतम होती है। प्रवेश-द्वार परिसर **मोही पर्वत पर लगभग 3,400 मी की ऊँचाई पर होगा और विस्तृत दक्षिणी पठार विस्तार के लिए सुरक्षित रहेगा।** स्थान की विशेषताएँ उत्कृष्ट हैं: ऊँचाई, समतल भूभाग, बस्तियों से 20 किमी से अधिक दूरी और टैंगानिका तथा किवू झीलों की निकटता।
- **वैकल्पिक स्थान।** कांगो लोकतांत्रिक गणराज्य के कितोम्ब बंदरगाह से **मोही पर्वत तक वैकल्पिक मार्ग लगभग 1,850 किमी होगा और पूरी तरह एक देश में रहेगा, जिससे रसद और कानूनी समन्वय सरल होगा।** किंतु इससे लगभग 13° का कक्षीय झुकाव बनेगा और माल को 0° भूस्थिर कक्षा या **लाग्रांज बिंदुओं तक भेजने** के लिए अतिरिक्त ~200–300 मी/सेकंड डेल्टा-वी चाहिए होगा। यह हर प्रक्षेपण में **वहन-भार द्रव्यमान** के लगभग 2–4% की हानि के बराबर है। इसलिए अधिक जटिल किंतु लगभग 3° झुकाव वाले अंतरराष्ट्रीय **भूमध्यरेखीय मार्ग का चयन**, पूरे सेवा-जीवन में अधिकतम आर्थिक दक्षता और कक्षीय अवसंरचना के सभी महत्वपूर्ण केंद्रों तक सीधी पहुँच के उद्देश्य से लिया गया रणनीतिक निर्णय है।

2.4. रणनीतिक

हर मौसम में चौबीसों घंटे चलने वाले अंतरिक्ष परिवहन गलियारे का निर्माण। दीर्घकाल में ऐसे मार्गों के नेटवर्क वैश्विक अवसंरचना, व्यापक निकासी की क्षमता वाला सभ्यतागत सुरक्षा उपाय और ऊर्जा-गहन तथा ऊष्मा पैदा करने वाले उद्योगों को पृथ्वी से बाहर ले जाने वाले पूर्ण अंतरिक्ष औद्योगिकीकरण का आधार बनेंगे।

रॉकेट प्रणालियाँ दावा की गई अत्यंत कम वहन-भार आपूर्ति लागत हासिल कर लें, तब भी रॉकेट प्रक्षेपण सीमित क्षमता वाली अलग घटना रहता है। इस अर्थ में, प्रति किलोग्राम कीमत चाहे जो हो, रॉकेट प्रणालियाँ स्वभाव से अभियान-आधारित रसद हैं। StarRoad ऐसा अवसंरचना गलियारा है जिसका उद्देश्य केवल एक प्रक्षेपण की लागत घटाना नहीं, बल्कि स्थिर और निरंतर माल प्रवाह बनाना है।

3. औद्योगिक और तकनीकी आधार

StarRoad को भौतिकी के नए नियम खोजने की आवश्यकता नहीं है; यह मौजूदा और उभरती तकनीकों के अभियांत्रिकी एकीकरण की पराकाष्ठा है:

3.1. चुंबकीय उत्तोलन और त्वरण (मैग्लेव)

यह चीन, जापान और जर्मनी के अनुभव पर आधारित है। चीन के मैग्लेव परीक्षण में एक टन को दो सेकंड में 0 से 700 किमी/घंटा तक पहुँचाने वाला रिकॉर्ड त्वरण, भारी वस्तुओं को तेजी से त्वरित करने की मूल व्यवहार्यता दिखाता है।

3.2. अतिचालक तकनीक और वितरित संरचना

StarRoad उलटी संरचना अपनाता है: मुख्य उत्तोलन और स्थिरीकरण क्षेत्र बनाने वाले अतिचालक चुंबक शटल पर रहते हैं और उसके निम्नतापी तंत्र से ठंडे किए जाते हैं। सुरंग में अपेक्षाकृत सरल और सस्ती ताँबे या एल्यूमिनियम की 'रेल' कुंडलियाँ होती हैं, जो निष्क्रिय मार्गदर्शक और स्पंदित त्वरण ऊर्जा के संचार के लिए द्वितीयक परिपथ बनती हैं। इससे सुरंग की लागत और जटिलता कई परिमाण घटती है तथा मुख्य तकनीकी जटिलता पुनःप्रयोग योग्य शटल पर चली जाती है, जहाँ केंद्रीय रूप से उसका रखरखाव किया जा सकता है।

3.3. स्पंदित ऊर्जा

मार्ग के साथ वितरित सुपरकैपेसिटर और बैटरी स्टेशन भू-तापीय स्वायत्त ताप-ऊर्जा प्रणाली के नेटवर्क से आवेशित होते हैं और त्वरक के आवश्यक खंड को गीगावाट-स्तरीय स्पंद देते हैं।

3.4. निर्वात प्रौद्योगिकी

CERN के लार्ज हैड्रॉन कोलाइडर, SpinLaunch और Hyperloop निर्वात नलियों का अनुभव।

3.5. अतिध्वनिक वायुगतिकी और तापीय सुरक्षा

अंतरिक्षयान, दिशा बदल सकने वाले पुनःप्रवेश यान और SpaceX Starship जैसी परियोजनाओं से मिला ज्ञान। सक्रिय शीतलन और अवस्था-परिवर्तन ताप संचायक।

3.6. नाभिकीय ऊर्जा प्रणालियाँ

कक्षा में शटल को शक्ति देने के लिए रेडियोआइसोटोप तापविद्युत जनित्रों से अगली पीढ़ी के छोटे ऑनबोर्ड रिएक्टर, या Helion Energy प्रणालियों जैसे भावी संलयन मॉड्यूल।

3.7. सुरंग निर्माण

आधुनिक सुरंग-वेधन मशीनें, जो प्रति वर्ष दसियों किलोमीटर आगे बढ़ सकती हैं; कई सुरंगें समानांतर खोदी जाती हैं।

3.8. स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली

परियोजना में संशोधित उन्नत भू-तापीय प्रणाली (Enhanced Geothermal Systems, EGS) तकनीक पर आधारित अपनी एकीकृत गीगावॉट-श्रेणी ऊर्जा और जलवायु अवसंरचना बनाना शामिल है। कार्य-द्रव्य के रूप में वायुमंडल से प्रत्यक्ष वायु ग्रहण (Direct Air Capture, DAC) द्वारा प्राप्त अतिसांद्र कार्बन डाइऑक्साइड (sCO₂) प्रयुक्त होती है। प्रणाली तीन निर्णायक कार्य जोड़ती है: 1) त्वरण-सुरंग की तापीय स्थिरता के लिए भू-तापीय क्षेत्र का सक्रिय प्रबंधन; 2) आधार-भार विद्युत उत्पादन; 3) वायुमंडलीय CO₂ का दीर्घकालिक पृथक्करण।

3.9. पराध्वनिक दहन

प्रवेश-द्वार का गैस-गतिक अवरोध वायु-हाइड्रोजन मिश्रण से चलने वाले वलयाकार पराध्वनिक जेट इंजनों का उपयोग करता है। पराध्वनिक दहन एक स्थिर शंकाकार गैस प्रवाह बनाता है जो सुरंग की धुरी के साथ बाहर की ओर जाता है। यह वायुमंडलीय हवा को हटाता है और शटल के गुजरते समय त्वरक के निर्वात की रक्षा करने वाला दाब-ढाल बनाता है।

3.10. पोर्टल का बंद ईंधन चक्र

गैस-गतिशील अवरोधक स्वच्छ, नवीकरणीय ईंधन का उपयोग करता है। जल के विद्युत अपघटन से हाइड्रोजन बनती है और इंजन वायुमंडलीय हवा को ऑक्सीकारक के रूप में लेते हैं। अवरोधक चालू होने के बाद मुख्य दहन-उत्पाद अतितप्त जलवाष्प होता है। इससे दूरस्थ पर्वतीय स्थल तक बड़ी मात्रा में रासायनिक ईंधन पहुँचाने और जमा करने की आवश्यकता समाप्त होती है, विश्वसनीयता बढ़ती है और परिचालन लागत घटती है।

3.11. तकनीक सत्यापन रणनीति

परियोजना विकास दो समानांतर मार्गों पर चलता है: गणितीय मॉडलिंग और महत्वपूर्ण संयोजनों का पूर्ण-पैमाने पर परीक्षण। इससे मुख्य परियोजना का जोखिम घटाते हुए अवधारणा की व्यवहार्यता शीघ्र सिद्ध होती है और सटीक अभियांत्रिकी आँकड़े मिलते हैं।

4. StarRoad के घटकों और तकनीकों का चरणबद्ध विस्तृत विवरण

4.1. त्वरण सुरंग और उसकी अवसंरचना

- **लंबाई:** लगभग 2,050 किमी।
- **अनुप्रस्थ काट।** दीर्घवृत्ताकार ($\sim 17.5 \times 12.5$ मी), शटल के वायुगतिकीय आकार और स्थिर चुंबकीय उत्तोलन के लिए अनुकूलित।
- **सुरंग की गहराई:** लगभग 8 किमी तक। भूवैज्ञानिक और तापीय दशाएँ अनुमति दें तो इसे और गहरा बनाया जा सकता है। त्वरण-सुरंग की स्वीकार्य गहराई विस्तृत भूवैज्ञानिक सर्वेक्षण के बाद ही तय की जा सकती है: मार्ग के साथ बोरहोल ड्रिलिंग, तापमान प्रोफाइल बनाना, चट्टान के तनाव, दरारों और जल-भूविज्ञान का आकलन। गहरी परतों का तापमान और ऊष्मा प्रवाह जितना कम होगा (संकेतित: लगभग 200–250°C तक), इंजीनियरिंग की दृष्टि से संभव गहराइयों का दायरा उतना व्यापक होगा और मार्ग की ज्यामिति—वक्रता त्रिज्या तथा संक्रमण खंड—अनुकूलित करने की स्वतंत्रता उतनी अधिक होगी। इससे लक्ष्य वेग बनाए रखते हुए सुरंग में चरम अतिभार और गतिशील भार घटाए जा सकते हैं।
- **निर्माण: मिश्रित।** आरंभिक खंड (लगभग 330 किमी) भूमिगत, हल्की ढाल वाली सीधी रेखा है जो त्वरण सरल बनाने के लिए प्रवेश-द्वार की दिशा में नीचे जाती है। मुख्य भाग तापीय स्थिरता, निर्वात पृथक्करण और सुरक्षा के लिए गहराई में या भूमिगत बनी सुरंग है।
- **मार्ग की ज्यामिति:** लगभग 330 किमी के बाद S-आकार का चाप।
 - **अवरोही चाप:** लगभग 6,300 किमी त्रिज्या; आवश्यक कोण बनाने के लिए सुरंग को धीरे-धीरे गहराई में ले जाता है।
 - **आरोही चाप:** 2,500–3,500 किमी त्रिज्या; सुरंग को क्षितिज से लगभग 5–6° के कोण पर प्रवेश-द्वार तक लाता है। त्रिज्याएँ ऐसी रखी गई हैं कि अतिध्वनिक वेग पर अभिकेंद्रीय त्वरण 4g से अधिक न हो।
- **निर्वात प्रणाली:** खंडित। लगभग 50 किमी का प्रत्येक खंड अपने निर्वात पंपों, संवेदकों और आपात वाल्वों के साथ स्वायत्त है।

4.1.1. त्वरण प्रणाली

शटल का त्वरण और स्थिरीकरण उसके ऑनबोर्ड अतिचालक चुंबकों तथा सुरंग में लगाए गए वितरित रैखिक विद्युतचुंबकीय चालकों (कुंडलियों) की परस्पर क्रिया से होता है। ये चालक सामान्य सुचालकों—तांबा और एल्युमिनियम—की खंडित निष्क्रिय कुंडलियाँ हैं और इन्हें क्रायोजेनिक शीतलन की आवश्यकता नहीं होती।

- **सुरंग के आरंभिक भाग (0–330 किमी)** में चालक मुख्यतः **पथ के नीचे होते हैं। वे उत्तोलन और 4g पर प्रारंभिक त्वरण के लिए चुंबकीय क्षेत्र बनाते हैं तथा गुरुत्व का सक्रिय प्रतिपूरण करते हैं।**
- **मध्य भाग (330–2,000 किमी), विशेषकर S-चाप में,** चालक **सुरंग की पूरी परिधि को घेरे रहते हैं। वे सटीक त्वरण, अतिध्वनिक वेग पर शटल को सुरंग के केंद्र में बलपूर्वक रोके रखने और मोड़ों में दिशा स्थिर करने का काम करते हैं।** अंतिम भाग के फर्श पर, जहाँ रेडियल त्वरण अधिक है, संरचनात्मक रूप से अतिरिक्त और प्रबलित कुंडली-सामग्री लगाई जाती है। 330–2,000 किमी खंड में त्वरण आरंभ के 4g से घटकर अंत में 0g हो जाता है; पथ के अंत तक अंतिम वेग लगभग 11 किमी/सेकंड पहुँचता है।
- **अंतिम भाग (2,000–2,050 किमी)** में आखिरी 50 किमी वायुमंडलीय प्रवेश-द्वार से निकलने से पहले स्थिरीकरण और केंद्रण के लिए हैं। इस खंड में त्वरण नहीं होता।

स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली के उपकेंद्रों से स्पंदित ऊर्जा, शटल की स्थिति के साथ पूर्ण समकालिकता में, निश्चित कुंडली-खंडों को **दी जाती है। इससे चलता हुआ** चुंबकीय क्षेत्र बनता है जो ऑनबोर्ड चुंबकों के क्षेत्र से क्रिया करके शटल को त्वरित करता है। यह वास्तुकला सुरंग की जटिलता घटाती है, उसकी मरम्मत आसान बनाती है और उच्च-प्रौद्योगिकी घटकों को पुनःप्रयोज्य शटल पर स्थानांतरित करती है।

4.1.2. स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली

तापीय स्थिरता, ऊर्जा स्वायत्तता और दीर्घायु सुनिश्चित करने के लिए हर त्वरण-सुरंग के साथ छोटे व्यास की सात सेवा-सुरंगों का परिसर चलता है, जो एकीकृत स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली बनाता है:

- **छह मुख्य संग्रहक-ऊर्जा सुरंगें (व्यास 2 मी)। ये त्वरण-सुरंग के फर्श से 30 मी नीचे, अक्षों के बीच 7 मी की समान दूरी पर हैं। वे जोड़ों में प्रतिवर्ती अवस्था में अत्यधिक शीतित ($+5^\circ\text{C}$) अतिसांद्र CO_2 प्रवाहित करती हैं। यह विन्यास त्वरक के पूरे काट के नीचे 15 मी से अधिक मोटी अखंड शीतित पट्टी बनाता है और तापीय सेतु पूरी तरह समाप्त करता है।**

- **एक तकनीकी सेवा-सुरंग (व्यास 3 मी) ,** जो त्वरण-सुरंग के समान स्तर पर, 3 मी बगल में है। यह यातायात रोके बिना निरंतर निदान और मरम्मत पहुँच देती है। भू-तापीय प्रणाली की सुरंगें उच्च आंतरिक दबाव—25 MPa तक—शैल-दबाव और गतिशील भार के संयुक्त प्रभाव के लिए बनी हैं। सातों सुरंगों की खुदाई पूरी तरह रोबोटिक सूक्ष्म टनल बोरिंग मशीनों (TBM) के बड़े से होती है। यह प्रणाली ऊर्जा अवसंरचना को परिवहन से भौतिक और कार्यात्मक रूप से अलग करती है, जिससे असाधारण विश्वसनीयता और मरम्मत-क्षमता मिलती है।

4.1.3. स्वायत्त भू-तापीय प्रणाली शीतलन प्रणाली

- **गहरा शीतलन परिपथ।** त्वरण -सुरंग के नीचे भू-तापीय प्रणाली की संग्रहक-ऊर्जा सुरंगों में CO₂-आधारित कार्य-द्रव्य घनी उच्च-दबाव या अतिसांद्र अवस्था में बहती है। गहरे संग्रहकों में प्रवेश से पहले सामान्य निम्न-ताप अवस्था में ठंडे प्रवाह का लक्ष्य तापमान लगभग +5...+15°C है। भू-तापीय ऊष्मा लेने और गहरे भाग से गुजरने के बाद CO₂, गहराई, शैल-ऊष्मा प्रवाह और उत्पादन अवस्था के अनुसार +100°C से अधिक गर्म हो सकती है। यह परिपथ भू-तापीय ऊष्मा हटाता है, मुख्य सुरंग के नीचे ठंडा क्षेत्र बनाता है और लगभग 5–8 किमी गहराई पर मार्ग का सुरक्षित निर्माण संभव करता है।

- **जल-तापीय मुख्य नहर।** StarRoad मार्ग के साथ, सेवा राजमार्ग, विद्युत पारेषण लाइन और संचार के समानांतर यह नहर बनाई जाती है। यह सभी टर्मिनलों को एक वितरित सतही ऊष्मा-निकासी प्रणाली में जोड़ती है।

जल-तापीय मुख्य नहर लगभग 5–8 मी चौड़ी और 2–3 मी गहरी जल-नहर है। तल में कई स्वतंत्र उच्च-दबाव कुंडलीदार पाइपलाइनें हैं, जिनसे CO₂ पड़ोसी टर्मिनलों के बीच बहती है। पानी तापीय बफर और मध्यवर्ती ऊष्मा-वाहक का काम करता है।

टरबाइन, ऊष्मा-विनिमय या संपीड़न नोडों के बाद CO₂ लगभग +50...+80°C पर कुंडलियों में आती है। लगभग 50 किमी के टर्मिनल-अंतर खंड में वह पानी को ऊष्मा देकर ऋतु, आर्द्रता, वर्षा की तीव्रता, रात के विकिरणीय शीतलन और नहर के संचालन के अनुसार लगभग +22...+35°C तक ठंडी हो जाती है।

सामान्य अवस्था में नहर का पानी लगभग +22...+32°C रखा जाता है; गर्म खंडों में स्थानीय रूप से +35...+45°C तक पहुँच सकता है। गर्म प्रवाह के प्रवेश के पास कुछ क्षेत्रों में पानी थोड़े समय के लिए +50...+80°C तक गर्म हो सकता है, जिससे जैविक सक्रियता कुछ घट सकती है; शोधन के बिना वह पेयजल नहीं बनता।

नहर ऊपर से हल्की चयनात्मक प्लेटों से ढकी है, जो सूर्य विकिरण परावर्तित करती हैं और अवरक्त क्षेत्र में ऊष्मा छोड़ने देती हैं।

- **टर्मिनल शीतलन।** हर टर्मिनल पर शीतलन स्तंभ, ऊष्मा-विनिमायक, पंप, बूस्टर कंप्रेसर, टर्बो-विस्तारक और आरक्षित चिलर हैं। सामान्य अवस्था में अधिकांश निम्न-स्तरीय ऊष्मा नहर से निष्क्रिय रूप से निकलती है।

शीतलन स्तंभ और टर्मिनल ऊष्मा-विनिमायक नहर के बाद CO₂ को लगभग +22...+35°C से +15...+25°C तक लाते हैं। आवश्यकता पर आरक्षित चिलर गहरे संग्रहकों में भेजने से पहले तापमान -5...+5°C तक घटाते हैं। चिलर मुख्य निरंतर साधन नहीं, बल्कि चरम, आपात या मौसमी आरक्षित साधन हैं।

- **बूस्टर संपीड़न और टर्बो- विस्तारक।** CO₂ अगले टर्मिनल पर ठंडी, लेकिन अधिक दबाव में पहुँचती है। फिर इसे टर्बो-विस्तारक में भेजा जा सकता है, जहाँ संपीड़न ऊर्जा का एक भाग पुनःप्राप्त होता है और विस्तार से तापमान और गिरता है—दबाव, प्रवाह और आवश्यक अवस्था के अनुसार लगभग -10...+5°C तक।

इसके बाद CO₂ आवश्यक तापमान, दबाव और अवस्था में भू-तापीय प्रणाली की संग्रहक सुरंगों में जाती है। यह चक्र मुफ्त ऊर्जा का स्रोत नहीं है: कंप्रेसर काम जोड़ता है, नहर संपीड़न ऊष्मा छोड़ती है और टर्बो-विस्तारक खर्च ऊर्जा का केवल भाग लौटाता है। लाभ यह है कि सक्रिय प्रशीतन संयंत्रों पर कम भार के साथ अधिक ठंडा प्रवाह मिलता है।

- **अतिरेक और द्विदिशता।** कुंडलीदार पाइपलाइनें दोहरी और द्विदिश बनाई जाती हैं। एक परिपथ क्षतिग्रस्त हो तो प्रवाह आरक्षित पाइप या पड़ोसी टर्मिनल से पुनर्वितरित होता है। CO₂ की दिशा तापीय भार, आपात अवस्था और अलग-अलग खंडों की स्थिति के अनुसार बदली जा सकती है।

- **मरम्मत-क्षमता।** मुख्य जल-तापीय नहर को लगभग हर किलोमीटर पर अवरोधों से खंडित किया जाता है। क्षति पर खंड अलग किया जाता है और पंप पानी को न्यूनतम तकनीकी स्तर तक घटाते हैं या भाग को आंशिक रूप से सुखाते हैं। दबाव हटने के बाद मरम्मत दल या रोबोटिक यंत्र पूरे मार्ग को रोके बिना कुंडलियों तक पहुँचते हैं। मरम्मत में शीतलन आरक्षित परिपथों, उलटे प्रवाह, पड़ोसी टर्मिनलों से बढ़े ऊष्मा-विनिमय और चिलरों के अस्थायी उपयोग से जारी रहता है।

- **सीमित जल-प्रबंधन कार्य।** नहर द्वितीयक जल-प्रबंधन भूमिका निभा सकती है। पूर्व से पश्चिम की स्थिर ढाल होने पर पानी धीमे गुरुत्वीय प्रवाह में चल सकता है, खंड धो सकता है और नियंत्रित रूप से अतिरिक्त जल छोड़ सकता है।

रात की भूमध्यरेखीय वर्षा को जल-संग्रह, तलछट टैंक, फ़िल्टर और अतिप्रवाह द्वारा नहर भरने में इस्तेमाल किया जा सकता है। पानी CO₂ को सीधे नहीं छूता; इसलिए स्थानीय निस्पंदन के बाद इसका सीमित सिंचाई, टर्मिनलों की तकनीकी जलापूर्ति, अग्निशमन भंडार और हरित सुरक्षा पट्टियों में उपयोग संभव है।

यह भूमिका द्वितीयक है: जल निकासी केवल उतनी हो सकती है जो नहर के मुख्य काम—CO₂ शीतलन और भू-तापीय प्रणाली की तापीय स्थिरता—को प्रभावित न करे।

- **StarRoad के लिए महत्व**। गहरे संग्रहक, जल-तापीय मुख्य नहर, टर्मिनल शीतक, शीतन स्तंभ, बूस्टर कंप्रेसर, टर्बो-विस्तारक और आरक्षित चिलर एक वितरित ताप-प्रबंधन प्रणाली बनाते हैं। इससे स्थानीय प्रशीतन मशीनों पर निर्भरता घटती है, विफलता-सहिष्णुता बढ़ती है, टर्मिनलों के बीच ऊष्मा-प्रवाह पुनर्वितरित किया जा सकता है और त्वरण-सुरंग को अधिक गहराई में बनाना व्यावहारिक होता है।

सतही शीतलन प्रणाली StarRoad का आर्थिक महत्व भी बढ़ाती है: मार्ग के साथ टर्मिनल, सेवा-सड़कें, ऊर्जा नोड, जल-नहर, औद्योगिक स्थल और सिंचित कृषि क्षेत्र की रेखीय पट्टी बनती है।

4.1.4. स्वायत्त भू-तापीय प्रणाली का रणनीतिक महत्त्व

ऊर्जा आपूर्ति और तापीय स्थिरीकरण के अतिरिक्त प्रणाली का निर्णायक काम मुख्य त्वरण-सुरंग को सुरक्षित और किफायती रूप से अत्यधिक गहराई—5–8 किमी या अधिक—पर बनाना संभव करना है। तापीय क्षेत्र का सक्रिय प्रबंधन और भू-तापीय प्रवाह की निकासी वे ताप सीमाएँ हटाते हैं जो अन्यथा ऐसी गहराई को असंभव बनातीं। इससे बड़े वक्रता-त्रिज्या वाली इष्टतम S-आकार की ज्यामिति संभव होती है, जो 2,050 किमी मार्ग में माल और चालक-दल के लिए स्वीकार्य लगभग 4g अतिभार रखते हुए शटल को सहजता से ऊपर ले जाने और क्षितिज से लगभग 5–6° पर बाहर निकालने के लिए आवश्यक है। इसलिए स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली केवल ऊर्जा नहीं, बल्कि StarRoad के पूरे बैलिस्टिक पथ-अनुकूलन की तकनीकी नींव है। पूरे परिसर की खुदाई पूर्णतः रोबोटिक सूक्ष्म TBM बेड़े से होती है।

4.1.5. लंबवत पार्श्व तकनीकी सुरंगों की प्रणाली

निर्माण, वायु-संचार, मरम्मत और निकासी के लिए मार्ग पर 50 किमी के अंतराल में 40 झुकी हुई परिवहन सुरंगें बनाई जाती हैं। प्रत्येक का झुकाव 30° और दीर्घवृत्ताकार काट लगभग 17.5 × 12.5 मी है। इन्हें मुख्य सुरंग वाली मशीनों से ही खोदा जाता है और ये सतह को 8 किमी तक की गहराई पर मुख्य गलियारे से जोड़ती हैं।

- **रसद। आपात** रुकावट (Alarm-2) पर कर्मचारियों और चालक-दल के लिए स्वतंत्र निकासी मार्ग देती हैं। ऊर्ध्व शाफ्ट के विपरीत ढलवाँ सुरंग में स्वचालित वाहन चल सकते हैं और एक यात्रा में दर्जनों लोगों को निकाल सकते हैं।
- **सुरक्षा। आपात** रुकावट (Alarm-2) पर कर्मचारियों और चालक-दल के लिए दूसरा स्वतंत्र निकासी मार्ग देती हैं।
- **विस्तार। ढलवाँ** सुरंगें भविष्य की समानांतर StarRoad लाइनों को जोड़ने का आधार हैं। उनसे नई त्वरण-सुरंगों तक क्षितिज शाखाएँ खोदी जा सकती हैं, जिससे पहुँच-मार्गों का नेटवर्क निरंतर बढ़ता परिवहन ढाँचा बनता है।
- **भू-तापीय प्रणाली** से एकीकरण। हर ढलवाँ सुरंग के नीचे अतिरिक्त 10–20 मी गहराई पर संग्रहक सुरंगें खोदी जाती हैं, जो निर्माण के समय शैल को पहले से जमाकर स्थिर करती हैं और बाद में ऊर्जा उत्पादन करती हैं।
- **सतही टर्मिनल परिसर। हर** ढलवाँ सुरंग सतह पर बहु-कार्यात्मक टर्मिनल में समाप्त होती है। 40 में से प्रत्येक टर्मिनल स्वतंत्र नोड है, जिसमें हैं:
 - **सुरंग की वायु-अवस्था बनाए रखने** और निकास वायु हटाने के लिए वेंटिलेशन और गैस-शोधन परिसर।
 - **मॉड्यूल, खुदी** सामग्री और निर्माण सामग्री के भंडारण, स्थानांतरण और अस्थायी रखाव वाले क्षेत्र सहित निर्माण आधार।
 - **पाली कर्मचारियों के लिए** प्रशासनिक और सुविधा भवन—नियंत्रण कक्ष, विश्राम कक्ष, कार्यशालाएँ और भंडार।
 - **गहरे संग्रहक सुरंगों के ऊष्मा-वाहक का उपयोग और** नियंत्रण करने वाला, साझा भू-तापीय नेटवर्क से जुड़ा भू-तापीय विद्युत संयंत्र और शीतलन इकाइयाँ।
 - **CO₂ ग्रहण और प्रसंस्करण केंद्र (DAC)**। यह वायुमंडल से कार्बन डाइऑक्साइड का प्रत्यक्ष ग्रहण करता है और भू-तापीय प्रणाली का बंद चक्र पूरा करता है: प्राप्त CO₂ द्रवीकृत, शुद्ध और ऊष्मा-वाहक के रूप में गहरे संग्रहक सुरंगों में भेजी जाती है।
 - **बाहरी विद्युत ग्रिड और संचार का संयोजन-** बिंदु—आरक्षित शक्ति और ब्रॉडबैंड चैनल।
 - **क्षेत्रीय परिवहन नेटवर्क से जोड़ने के लिए** पहुँच मार्ग—सड़कें या रेल शाखाएँ।
 - **सतह पर निकासी** केंद्र, जो आपात चिकित्सा चौकी और हेलिपैड से लैस है।

- **कानूनी और पर्यावरणीय लचीलापन।** झुकी हुई सेवा-सुरंगें सतही टर्मिनलों को संरक्षित भूमि—राष्ट्रीय उद्यान, अभयारण्य और जलग्रहण क्षेत्र—से बाहर रखने देती हैं, तब भी जब StarRoad उनके बहुत नीचे से गुजरता हो। इससे पार्क की सीमा के भीतर अवसंरचना बनाए बिना संरक्षण क्षेत्रों के नीचे मार्ग ले जाने की मुख्य कानूनी बाधा दूर होती है। हर टर्मिनल निकटतम असंरक्षित स्थान पर बनता है और झुके शाफ्ट से जुड़ता है; इससे अनुमति सरल होती है, पर्यावरणीय दबाव घटता है और संरक्षित पारितंत्रों पर सीधा असर समाप्त होता है।

4.1.6. विद्युत आपूर्ति और ऊर्जा संचयन प्रणाली

StarRoad त्वरक की विद्युत आपूर्ति तीन-स्तरीय नेटवर्क है, जो देता है:

- सुनिश्चित अतिरेक—एकल घटक की विफलता संचालन नहीं रोकती;
- अनुकूली निर्गम गति—आरंभ में सेकंड से अंत में माइक्रोसेकंड तक;
- शक्ति केबलों की न्यूनतम लंबाई—हानि और प्रेरकत्व घटते हैं।

○ टोपोलॉजी के स्तर

स्तर 0: प्राथमिक संचयक—टर्मिनल

- 40 टर्मिनल; हर एक में गुरुत्वीय संचयक, पंपित जलविद्युत भंडारण—नहर के सूक्ष्म जलविद्युत संयंत्र—और लिथियम-आयन बैटरियों (BESS) का समूह है।
- प्रति टर्मिनल कुल क्षमता: लगभग 5–9 GWh; पूरे मार्ग में लगभग 360 GWh।
- निर्गम: तकनीकी सुरंग में मुख्य केबलों द्वारा 100 kV तक उच्च-वोल्टेज DC।

स्तर 1: खंड नियंत्रक—50 किमी खंड

- मार्ग 41 खंडों में विभाजित है—प्रत्येक 50 किमी; अंतिम खंड प्रवेश-द्वार तक 50 किमी।
- हर खंड का मुख्य वितरण नियंत्रक दो पड़ोसी टर्मिनलों से ऊर्जा लेता है—पारस्परिक अतिरेक।
- खंड नियंत्रक ऊर्जा को एक-एक किलोमीटर के ऊर्जा ब्लॉकों में बाँटता और उनका संचालन समकालिक करता है।

स्तर 2: एक-किलोमीटर ऊर्जा खंड। हर खंड का स्थानीय नियंत्रक इन कार्यों को करता है:

- खंड नियंत्रक से ऊर्जा लेता है;
- मुख्य सुरंग की दीवारों के नीचे स्थित बफर लिथियम-आयन बैटरियाँ नियंत्रित करता है;
- सुरंग की दीवारों के पीछे विशेष कोटरों में रखे फ्लाइव्हील और आयोनिस्टर—सुपरकैपेसिटर—से जुड़े स्विच योग्य कुंडली-समूह नियंत्रित करता है।

खंड नियंत्रक से हर किलोमीटर ब्लॉक तक दो स्वतंत्र चैनल अतिरेक देते हैं।

○ केबल मार्गों की वास्तुकला

- **मुख्य केबल (स्तर 0→1):** मुख्य सुरंग से 3 मी दूर समानांतर चलने वाली तीन-मीटर तकनीकी सेवा-सुरंग में बिछते हैं।
- **मार्ग पर वितरण:** हर टर्मिनल से केबल दोनों दिशाओं में 50 किमी—कुल 100 किमी—चलते हैं और पड़ोसी टर्मिनलों के कार्यक्षेत्रों को आच्छादित करते हैं। इसलिए हर खंड को कम-से-कम दो पड़ोसी टर्मिनल शक्ति देते हैं और 100% अतिरेक मिलता है।
- **मुख्य सुरंग में प्रवेश:** हर 1 किमी पर केबल सीलबंद पारगमनों से तकनीकी सुरंग से मुख्य सुरंग में आते और किलोमीटर ब्लॉक नियंत्रक से जुड़ते हैं।
- **ब्लॉक के भीतर वितरण:** नियंत्रक के बाद शक्ति दो समानांतर पथों में बाँटी जाती है:

पथ A: बफर लिथियम-आयन बैटरियों तक—प्रति ब्लॉक लगभग 0.5–1 GWh, सेकंड-स्तरीय शिखर समतल करने के लिए।

पथ B: सुरंग की दीवारों के पीछे लगे फ्लाइव्हील—जड़त्वीय संचयक—और आयोनिस्टर—सुपरकैपेसिटर—के माध्यम से स्विच योग्य कुंडली-समूहों तक।

- **विसर्जन दर का तीन-क्षेत्रीय अनुकूलन।** शटल का त्वरण प्रोफ़ाइल इस प्रकार अनुकूलित है कि प्रति कुंडली समूह चरम शक्ति शुरुआत में सबसे अधिक हो, जहाँ अतिसूक्ष्म स्पंद आवश्यक नहीं, और मार्ग के अंत की ओर घटे। इससे तीनों क्षेत्रों में अलग भंडारण और स्विचिंग तकनीकें इस्तेमाल की जा सकती हैं:

क्षेत्र	मार्ग खंड	निर्वहन का स्वरूप	संचयक/स्विचिंग का प्रकार	कारण
क्षेत्र I—कम गति	0–200 किमी	सेकंड से मिलीसेकंड	लिथियम-आयन बैटरियाँ + मानक IGBT इन्वर्टर	शटल धीमा है; एक किलोमीटर पार करने में 0.1 सेकंड से अधिक लगता है। बफर के बिना BESS से काम संभव है।
क्षेत्र II—मध्यम गति	200–1,000 किमी	मिलीसेकंड से माइक्रोसेकंड	बफर लिथियम-आयन बैटरियाँ + जड़त्वीय फ्लाइव्हील + SiC इन्वर्टर	शटल गति बढ़ाता है; तेज स्विचिंग चाहिए, किंतु यांत्रिक फ्लाइव्हील अभी भी स्वीकार्य हैं।
क्षेत्र III—उच्च गति	1,000–2,000 किमी	माइक्रोसेकंड स्पंद	आयोनिस्टर (सुपरकैपेसिटर) + तेज थाइरिस्टर स्विच (GTO/IGCT)	एक किलोमीटर पार करने का समय घटकर 0.09 सेकंड हो जाता है। केवल नैनोसेकंड प्रतिक्रिया वाले सुपरकैपेसिटर और आयोनिस्टर स्पंद को स्थिर कर सकते हैं।

महत्वपूर्ण: क्षेत्र III में प्रति किलोमीटर आवश्यक ऊर्जा क्षेत्र I से कम है—त्वरण घटने के कारण। इसलिए तेज निर्गम की कठोर माँग के बावजूद घटकों पर भार कम रहता है।

○ अतिरेक और आपात सहनशीलता

- **नियंत्रक दोहराव:** हर खंड और किलोमीटर नियंत्रक में सक्रिय आरक्षित इकाई है—स्वतंत्र शक्ति वाली दो समान पट्टियाँ।
- **पारस्परिक शक्ति:** हर किलोमीटर ब्लॉक अपने खंड नियंत्रक के साथ पड़ोसी नियंत्रकों से भी तकनीकी सुरंग की आरक्षित केबलों द्वारा ऊर्जा ले सकता है।
- **स्थानीय कुंडली अतिरेक:** हर किलोमीटर ब्लॉक में तीन स्वतंत्र कुंडली-समूह हैं, जो बारी-बारी स्विच होते हैं। एक क्षतिग्रस्त हो तो अन्य दो कम दक्षता पर, लेकिन बिना रुके त्वरण जारी रखते हैं।
- **आपात पृथक्करण:** शॉर्ट सर्किट या अत्यधिक ताप पहचानने पर किलोमीटर नियंत्रक अपने ब्लॉक की शक्ति बंद कर देता है और उसे अंतर-खंड अवरोधों से अलग करता है; पड़ोसी ब्लॉक प्रभावित नहीं होते।

○ भौतिक कार्यान्वयन और निष्कर्ष

घटक	स्थान	कार्य
प्राथमिक संचयक	सतह पर—टर्मिनल	दीर्घकालिक ऊर्जा संचयन—360 GWh।
मुख्य केबल	तकनीकी सुरंग—3 मी	अतिरेक सहित टर्मिनलों से खंडों तक ऊर्जा पहुँचाना।
खंड नियंत्रक	मुख्य सुरंग के कोटरों में—हर 50 किमी	10 किलोमीटर ब्लॉकों में ऊर्जा वितरण और समकालिकता।
बफर लिथियम-आयन बैटरियाँ	मुख्य सुरंग की दीवारों के नीचे	क्षेत्र I–II में सेकंड-स्तरीय शिखरों को समतल करना।
फ्लाइव्हील	सुरंग की दीवारों के पीछे—क्षेत्र II	मिलीसेकंड स्पंदों का बफर।
आयोनिस्टर—सुपरकैपेसिटर	सुरंग की दीवारों के पीछे—क्षेत्र III	माइक्रोसेकंड स्थिरीकरण और गिरावट की भरपाई।
स्थानीय किलोमीटर नियंत्रक	हर 1 किमी पर कोटरों में	कुंडली स्विचिंग, स्थिति निगरानी और बफर नियंत्रण।
त्वरक कुंडलियाँ	सुरंग की आंतरिक सतह	शटल के त्वरण के लिए चलता चुंबकीय क्षेत्र बनाना।

○ विद्युत आपूर्ति वास्तुकला के लाभ

- **भार का सहज वितरण।** सुरंग की पूरी लंबाई पर एक साथ चरम शक्ति नहीं चाहिए: आरंभ में स्पंद धीमे हैं, अंत में छोटे पर कम शक्तिशाली।
- **हर स्तर पर अतिरेक।** एक टर्मिनल, नियंत्रक या पूरा 50 किमी खंड विफल हो जाए तो भी प्रणाली नहीं रुकती—पड़ोसी टर्मिनल और खंड ऊर्जा की कमी पूरी करते हैं।
- **विस्तार में लचीलापन।** नई समानांतर StarRoad लाइन जोड़ने के लिए ऊर्जा प्रणाली फिर बनानी नहीं पड़ती; मौजूदा तकनीकी सुरंग में अतिरिक्त मुख्य केबल बिछाना पर्याप्त है।
- **लागत अनुकूलन।** महँगे आयोनिस्टर और फ्लाइव्हील केवल वहीं लगते हैं जहाँ वास्तव में आवश्यक हैं—अंतिम खंडों में—जबकि आरंभ में सस्ती लिथियम-आयन बैटरियाँ चलती हैं।

4.2. वायुमंडलीय प्रवेश-द्वार (ऊँचाई पर स्थित टर्मिनल)

यह 'अंतिम मील' की समस्या समाप्त करता है।

4.2.1. स्थान और संरचना

प्रवेश-द्वार परिसर कांगो लोकतांत्रिक गणराज्य में मोही पर्वत के शिखर-पठार (लगभग 3,400 मी) पर स्थित है। भविष्य के विस्तार के लिए 16 किमी दक्षिण में एक विशाल दक्षिणी पठार आरक्षित है, जहाँ दर्जनों समानांतर प्रवेश-द्वार समा सकते हैं। यह मुख्य यांत्रिक अवरोध और गैस-गतिशील अवरोध बनाने वाली प्रणालियों वाला विशाल ढाँचा है। वास्तव में यह भूमि पर स्थापित, तीन वलयाकार नोज़लों वाला स्थिर जेट इंजन है जिसे आकाश की ओर कोण बनाकर रखा गया है—किसी पिंड को त्वरित करने के लिए नहीं, बल्कि वायुमंडलीय हवा हटाने और शटल के वायुमंडल में प्रवेश के समय बफर बनाने के लिए।

4.2.2. गैस-गतिशील अवरोध

मुख्य कार्यकारी घटक। शटल के निकट आने पर, कुछ सेकंड पहले, सुरंग की धुरी के साथ बाहर की ओर निर्देशित शंकाकार पराध्वनिक गैस-प्रवाह बनाया जाता है।

- **स्रोत और संरचना।** गैस-गतिशील अवरोध तीन स्वतंत्र, संकेंद्रित वलयाकार जेट इंजनों (पट्टियों) या समान तीन-पट्टी विन्यास वाले अतिध्वनिक रैमजेट इंजनों से बनता है। ये प्रवेश-द्वार के मुख के चारों ओर लगे हैं और वायु-हाइड्रोजन ईंधन मिश्रण पर चलते हैं; हाइड्रोजन स्थल पर विद्युत-अपघटन से बनता है। तीन गुना अतिरेक विफलता-सहिष्णुता देता है: प्रभावी अवरोध के लिए किन्हीं दो पट्टियों का चलना पर्याप्त है, इसलिए तीन में से एक के विफल होने पर भी प्रणाली काम करती है। हर पट्टी की अपनी ईंधन-आपूर्ति, नियंत्रण और प्रज्वलन प्रणाली है। पट्टियाँ प्रवेश-द्वार के बाहरी भाग में एक-दूसरे के ऊपर, छोटी से बड़ी पट्टी की ओर पीछे हटते सोपानों में लगी हैं; यांत्रिक अवरोध उनके क्रम के पीछे, प्रवेश-द्वार के भीतर है। इससे यांत्रिक अवरोध पहले खोले बिना पट्टियाँ चालू की जा सकती हैं।

- **मुख्य कार्य ।**

1) शटल के गुजरते समय सुरंग के निर्वात की रक्षा के लिए बाहर की ओर दबाव बनाना;

2) प्रवेश-द्वार के आगे निकास क्षेत्र में वायुमंडलीय हवा को पहले से हटाना और गर्म करना, ताकि सुरंग के निर्वात और वायुमंडल की सीमा पर ढाल बने और दोनों माध्यमों के बीच क्रमिक संक्रमण तैयार हो।

गैस-गतिशील अवरोध शटल की वायुगतिकीय सुरक्षा नहीं है और उसे वायुमंडल से ढकता नहीं। इसका काम माध्यमों के बीच संक्रमण को समय में फैलाना है: ठंडी, स्थिर हवा से संपर्क की लगभग तात्कालिक, माइक्रोसेकंड वाली आघात-लोडिंग को गर्म, उसी दिशा में बहते प्रवाह के साथ संपर्क की वितरित मिलीसेकंड लोडिंग में बदलना। इससे कुल वायुगतिकीय बल कम नहीं होते, पर झटका (jerk) और भार का उच्च-आवृत्ति घटक बहुत घटता है, जिससे स्थानीय टूट-फूट और संरचनात्मक तापीय आघात का जोखिम कम होता है।

- **प्रवाह का आकार:** सुरंग और शटल के अनुप्रस्थ काट से मेल खाता दीर्घवृत्ताकार शंकु। यह दसियों से सैकड़ों मीटर लंबा होता है और वायुमंडलीय प्रवेश-द्वार की जेट पट्टियों के वलयाकार नोज़लों की तीन पंक्तियों से बाहर निकलता है।

वायुमंडलीय प्रवेश-द्वार के गैस-गतिशील अवरोध के लिए ज्यामितीय रूप से पूर्ण, स्थिर या कड़ाई से अक्ष-सममित शंकु बनाना आवश्यक नहीं है। इसका कार्य-विन्यास मूलतः गतिशील है और प्रवाह के आकार, घनत्व तथा वेग में समयिक और स्थानिक उतार-चढ़ाव स्वीकार करता है।

प्रवेश-द्वार की कार्यक्षमता की निर्णायक और एकमात्र कठोर शर्त यह है कि शटल के पूरे निकास के दौरान दबाव और संवेग की धनात्मक, बाहरमुखी ढाल बनी रहे, जो वायुमंडलीय हवा को सुरंग में प्रवेश करने से पूरी तरह रोके। साथ ही निकास क्षेत्र में वायुमंडल की अग्रिम गैस-गतिशील और तापीय तैयारी आवश्यक है; इससे प्रणाली की विश्वसनीयता और व्यावहारिकता काफी बढ़ती है।

इसलिए प्रवाह का आकार लक्ष्य मात्रा नहीं, बल्कि अनुकूली पैरामीटर माना जाता है। इसे कठोर ज्यामिति के बजाय समेकित गुणों—दबाव, द्रव्यमान प्रवाह और संवेग—के आधार पर वास्तविक समय में अनुकूलित किया जाता है।

- **मापनीयता और परीक्षण।** हजारों किलोमीटर लंबे त्वरक के विपरीत प्रवेश-द्वार की रचना मॉड्यूलर है और आसानी से बड़े पैमाने पर दोहराई जा सकती है। स्थिर पराध्वनिक गैस-गतिशील शंकु बनाना, समकालिकता और जेट पट्टियों का संचालन जैसी मुख्य प्रौद्योगिकियाँ पूर्ण-कार्यात्मक वास्तविक परीक्षण-स्थलों पर 1:5 या 1:10 पैमाने में पूरी तरह परखी जा सकती हैं। इससे मुख्य मार्ग का पूर्ण निर्माण शुरू होने से पहले परियोजना के प्रमुख तकनीकी जोखिम दूर किए जा सकते हैं।

4.2.3. सुरक्षा प्रणाली

हाइड्रोजन के उपयोग के कारण विस्फोट और अग्नि-सुरक्षा की आवश्यकताएँ अधिक कठोर हैं। प्रवेश-द्वार की पूरी अवसंरचना इसी के अनुसार बनाई जाती है: हाइड्रोजन रिसाव पहचान की दोहरी प्रणालियाँ, लाइनों की नाइट्रोजन से निष्क्रिय फ्लशिंग, विस्फोट-सुरक्षित उपकरण, विद्युत-अपघटन इकाइयों, भंडारों और इंजन पट्टियों का भौतिक पृथक्करण, तथा संभावित उत्सर्जन को कर्मचारियों और महत्वपूर्ण अवसंरचना से दूर वायुमंडल में सुरक्षित दिशा देने वाले वेंटिलेशन चैनल।

4.3. शटल (AstroLiner)

4.3.1. आयाम और प्रक्षेपण द्रव्यमान

लंबाई लगभग 150 मी, दीर्घवृत्ताकार अनुप्रस्थ काट लगभग 10×15 मी। आकृति एक अतिध्वनिक वेज है, जिसे वायुमंडल भेदते समय प्रतिरोध और तापीय भार न्यूनतम रखने के लिए अनुकूलित किया गया है।

- **इष्टतम प्रक्षेपण द्रव्यमान: लगभग 15,000 टन।**

15,000 टन का शटल द्रव्यमान उस इंजीनियरिंग और आर्थिक इष्टतम का परिणाम है जो भौतिक सीमाओं और कार्यान्वयन की संभावनाओं के बीच 'मध्य मार्ग' में स्थित है।

मानदंड	निचली सीमा (< 8,000–10,000 टन)	इष्टतम (15,000 टन)	ऊपरी सीमा (> 20,000–25,000 टन)
वायुगतिकी और अतिभार	वायुमंडल प्रभावी रहता है। प्रतिरोध बल $F_d = \rho \cdot A \cdot v^2$ से बड़ा अतिभार $a = F_d/m$ बनता है, जिसके लिए जटिल सक्रिय स्थिरीकरण चाहिए और तापीय भार चरम पर पहुँचता है।	जड़त्व प्रभावी रहता है। वायुमंडलीय प्रतिरोध आरंभ में थोड़े समय—5 सेकंड तक—के लिए लगभग 3–6g अतिभार उत्पन्न करता है, जिससे सरलतर आघात-शमन और ताप-सुरक्षा प्रणालियाँ इस्तेमाल की जा सकती हैं।	अतिभार केवल थोड़ा घटता है, जबकि अन्य कारक लाभों को निष्प्रभावी कर देते हैं।
तापीय अवस्था	कम ऊष्मा-धारिता। छोटा द्रव्यमान m तापमान $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$ को तेजी से बढ़ाता है, जिससे अत्यधिक सक्रिय शीतलन प्रणालियाँ आवश्यक होती हैं।	उच्च तापीय जड़त्व। भारी संरचना वायुमंडल के संक्षिप्त भेदन की चरम ऊष्मा सोखती और फैलाती है, इसलिए निष्क्रिय और सक्रिय ताप-सुरक्षा का संयोजन संभव होता है।	ऊष्मा-धारिता बढ़ती है, पर विशाल संरचना से ऊष्मा निकालना स्वयं एक अलग समस्या बन जाता है।
प्रक्षेपण ऊर्जा	आवश्यक ऊर्जा $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ स्वीकार्य है, लेकिन कमियों की भरपाई नहीं करती।	तर्कसंगत संतुलन। 11 किमी/सेकंड तक त्वरण के लिए लगभग 9×10^{14} जूल (लगभग 252 GWh) चाहिए, जो वितरित स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली और संचयकों की क्षमताओं के अनुरूप है।	ऊर्जा लागत द्रव्यमान के साथ रैखिक रूप से बढ़ती है, पर आवश्यक शक्ति और संचयन क्षमता असंगत रूप से बढ़ानी पड़ती है, जो आर्थिक रूप से अक्षम है।
संरचना और रसद	व्यवहार्य, पर 'जड़त्वीय राम' का मुख्य लाभ नहीं देता।	मौजूदा प्रौद्योगिकियों के अनुकूल। आकार और द्रव्यमान आधुनिक जहाज़-निर्माण गोदियों, वेल्डिंग विधियों और परिवहन क्षमताओं के भीतर हैं।	संरचना कठोरता खोती है; प्राकृतिक दोलन, संयोजन और प्रक्षेपण स्थल तक पहुँचाने की समस्याएँ पैदा होती हैं। लागत रैखिक से अधिक तेजी से बढ़ती है।
StarRoad का दर्शन	यह वायुमंडल के प्रति संवेदनशील 'हल्के यान' की धारणा में ही रहता है।	यह 'जड़त्वीय राम' की धारणा साकार करता है: वायुमंडल कोई अवरोध नहीं, बल्कि अल्पकालिक विक्षोभ है जिसे द्रव्यमान और मजबूती से पार किया जाता है।	यह उद्योग की क्षमता से बाहर की समस्या बन जाता है और पैमाने की अर्थव्यवस्था समाप्त कर देता है।

- **भौतिक** रूप से यह उस सीमा—लगभग 10,000 टन—से ऊपर है जिसके बाद जड़त्व वायुगतिकीय प्रभाव पर हावी होने लगता है।
- **ऊर्जा की दृष्टि** से यह अवसंरचना की आवश्यकताओं में घातांकीय वृद्धि नहीं करता।
- **प्रौद्योगिकी की दृष्टि** से यह विस्तार योग्य औद्योगिक पद्धतियों—जहाज़-निर्माण और भारी मशीनरी—की सीमा में रहता है।
- **अर्थशास्त्र की दृष्टि** से यह पैमाने से मिलने वाली कम प्रक्षेपण लागत और पूँजीगत व्यय की सीमा के बीच संतुलन बनाता है।

अतः यह पैरामीटर गणितीय इष्टतम है जो **StarRoad अवधारणा को भौतिक रूप से व्यवहार्य और आर्थिक रूप से उचित बनाता है।**

4.3.2. विन्यास और प्रणालियाँ

पूरी आंतरिक वास्तुकला बहु-स्तरीय अनुदैर्घ्य संरचना के रूप में बनाई गई है, जिसमें धड़ की ऊँचाई के अनुसार कार्य विभाजित हैं।

- **धड़ का निचला और पिछला** भाग पूरी तरह ऊर्जा और शक्ति प्रणालियों के लिए है: ऑनबोर्ड रिएक्टर, ऊष्मा-विनिमायक, सक्रिय शीतलन परिपथ, शक्ति परिवर्तक, ऊर्जा संचयक, शीतलक लाइनें और समुद्री प्रणोदन के घटक। इससे शटल का गुरुत्व-केंद्र नीचे आता है, अतिध्वनिक उड़ान, ग्लाइड और जल-अवतरण में स्थिरता बढ़ती है, तथा ऊपरी खंडों की तापीय और विकिरण सुरक्षा सरल होती है।
- **अतिचालक उत्तोलन और स्थिरीकरण प्रणाली शटल के** दोनों पार्श्वों और आंशिक रूप से तले में समाहित है। अतिचालक मॉड्यूल बाहरी त्वचा और ताप-सुरक्षा परत के ठीक पीछे लगे हैं, जिससे चुंबकीय क्षेत्र और सुरंग की निष्क्रिय कुंडलियों के बीच का अंतर न्यूनतम रहता है। चुंबक इस प्रकार लगाए जाते हैं:

- धड़ की पूरी लंबाई में दोनों पार्श्वों पर, खिसकने वाले ऊपरी द्वारों की रेखा तक ऊपरी और मध्य क्षेत्रों सहित;
- तले के मध्य और पिछले भाग में;
- मुख्य पंखों के निकलने और यांत्रिक खोंचों वाले क्षेत्रों को छोड़कर।

यह वितरण एकसमान चुंबकीय क्षेत्र, अतिध्वनिक वेग पर उच्च स्थिरता और स्थानीय क्षति की स्थिति में विफलता-सहिष्णुता देता है।

- **धड़ का मध्य भाग** मोड़कर रखे जाने वाले पंखों की कोटरों और उनके भार-वहन फ्रेम के लिए है। मुख्य पंख धड़ के भीतर सिमटते हैं और ऊर्जा व माल खंडों से पृथक रहते हैं। नाक के मध्य क्षेत्र का अग्रभाग छोटे निकलने वाले नियंत्रण पंखों के लिए है, जो संक्रमण अवस्थाओं में पथ-सुधार और स्थिरीकरण करते हैं।
- **धड़ का ऊपरी भाग** सार्वभौमिक, बदलने योग्य पेलोड मॉड्यूल के लिए है। मॉड्यूल के आयाम, जोड़-बिंदु, द्रव्यमान और स्वीकार्य गुरुत्व-केंद्र मानकीकृत हैं; इसे मालवाहक, टैंकर, यात्री या मिश्रित रूप में विन्यस्त किया जा सकता है। इसे प्रक्षेपण से पहले गोदी में लगाया और निकाला जाता है; ऊपरी द्वार खुलने के बाद कक्षा में भी यह संभव है। माल-खंड में अंतर्निर्मित हाइड्रॉलिक या विद्युत-यांत्रिक लिफ्ट और मार्गदर्शक हैं, जो सूक्ष्म गुरुत्व में बिना चालक-दल के मॉड्यूल को स्वचालित रूप से बाहर निकालते हैं।
- **खिसकने वाले ऊपरी द्वार** मुख्य भार-वहन ढाँचे का हिस्सा नहीं हैं; वे वायुगतिकीय आवरण और कक्षीय पहुँच देते हैं। ताप-नियंत्रण प्रणाली के मोड़कर रखे जाने वाले रेडिएटर पैनल उनमें समाहित हैं। द्वार पूरी तरह खुलकर लॉक होने के बाद पैनल स्वतः फैलते हैं और अतिरिक्त ऊष्मा निर्वात में निकालने के लिए उनमें शीतलक प्रवाहित किया जाता है।
- **शटल की नाक में** बहु-स्तरीय कार्यात्मक विन्यास है:
 - ऊपरी नाक क्षेत्र—ब्रिज, नियंत्रण, नौवहन और संचार प्रणालियाँ;
 - मध्य नाक क्षेत्र—छोटे निकलने वाले पंखों और नियंत्रण सतहों की यंत्रावली;
 - निचला नाक क्षेत्र—क्रायेोजेनिक ईंधन और शीतलक टैंक, ताकि द्रव प्रतिरोध न्यूनतम हो और वायुमंडल भेदते समय नाक की सक्रिय शीतलन प्रणालियों को शीतलक सबसे तेजी से मिल सके।

यह विन्यास तापीय और द्रव परिपथ छोटे रखता है, नाक का तापीय जड़त्व घटाता है और उड़ान के सर्वाधिक भार वाले चरण में ताप-सुरक्षा की विश्वसनीयता बढ़ाता है। समग्र शटल विन्यास कठोरता से संरचित, विस्तार योग्य और मॉड्यूलर वास्तुकला है, जिसे अतिध्वनिक प्रक्षेपण, कक्षीय संचालन, स्वायत्त समुद्री यात्रा और धड़ की व्यापक पुनःजोड़ाई के बिना बार-बार उपयोग के लिए अनुकूलित किया गया है।

4.3.3. धड़ की ताप-सुरक्षा

शटल की नाक और तला बहु-स्तरीय मिश्रित-धातु ताप-सुरक्षा प्रणाली से लैस हैं, जिसे अतिध्वनिक उड़ान और बाद के जल-अवतरण के अत्यधिक तापीय और गतिशील भारों के लिए बनाया गया है। इसमें निष्क्रिय और सक्रिय घटक साथ काम करते हैं:

- बाहरी तापरोधी परत, जो हजारों डिग्री के अल्पकालिक तापमान और तीव्र विकिरणीय तापन को सहती है;
- भार-वहन धातु अधःपरत, जो यांत्रिक और कंपन भार ग्रहण करती है;
- सक्रिय शीतलन परिपथ, जो सर्वाधिक भार वाले क्षेत्रों—मुख्यतः नाक और तले के अग्र किनारे—से ऊष्मा हटाते हैं;
- स्थानीय निर्णायक क्षेत्रों में बदलने योग्य अपक्षयी घटक, जो मुख्य संरचना को क्षति पहुँचाए बिना नियंत्रित रूप से घिसते हैं;

ताप-सुरक्षा प्रणाली समुद्र में उतरते समय गर्म धड़ और पानी के संपर्क से होने वाले तापीय आघात—तीव्र तापमान ढाल और चक्रीय तापीय तनाव—को ध्यान में रखकर बनाई गई है। सर्वाधिक भार वाले घटक खंडित हैं और नियमित रखरखाव में मॉड्यूलर ढंग से बदले जा सकते हैं, जिससे मरम्मत-क्षमता और पुनःप्रयोग का जीवन बढ़ता है।

4.3.4. पंख

शटल में निकलने वाले पंखों के दो जोड़े हैं, जो स्थिरीकरण, ग्लाइड और अवतरण के लिए हैं। वे विरल वायुमंडलीय परतों में पहुँचने के बाद खुलते हैं।

- **अग्र पंखों का** जोड़ा पथ-सुधार, पिच और रोल स्थिरीकरण तथा गतिशील विक्षोभों का अवमंदन करता है। ग्लाइड के लिए ये विरल वायुमंडलीय परतों में पहुँचने के बाद खुलते हैं।

प्रत्येक अग्र पंख के पैरामीटर:

- लंबाई (जड़ से फैलाव): लगभग 35 मी;
- जड़/सिरे पर चौड़ाई: लगभग 14/7 मी;
- क्षेत्रफल: लगभग 360–400 मी²।

- **पिछले पंखों का** जोड़ा शटल की मुख्य वायुगतिकीय सतह है।

प्रत्येक पिछले पंख के पैरामीटर:

- लंबाई (जड़ से फैलाव): लगभग 100 मी;
- जड़/सिरे पर चौड़ाई: लगभग 14/7 मी;
- क्षेत्रफल: लगभग 1,000–1,100 मी²।

पंखों का कुल क्षेत्रफल लगभग 2,800–2,900 मी² है। धड़ की भार-वहन आकृति भी उत्थापन बढ़ाती है और प्रभावी वायुगतिकीय क्षेत्रफल में लगभग 20–30% जोड़ती है।

उपध्वनिक अवस्था में यह पूरा विन्यास लगभग $L/D \approx 9-13$ का वायुगतिकीय अनुपात देता है, जिससे स्थिर ग्लाइड और नियंत्रित अवतरण-बिंदु चयन संभव होता है। ग्लाइड और जल-अवतरण की सामान्य गति 90–120 मी/सेकंड (लगभग 320–430 किमी/घंटा) आंकी गई है। इन गतियों पर सुरक्षा निरपेक्ष क्षैतिज वेग से नहीं, बल्कि स्पर्श के ऊर्ध्व वेग, आक्रमण कोण और ग्लाइड-पथ से तय होती है।

4.3.5. पैराशूट प्रणालियाँ

जल-अवतरण के आघात-भार घटाने और स्वीकार्य अवतरण-सीमा बढ़ाने के लिए शटल में पुनःप्रयोज्य पैराशूट-पैराफॉइल प्रणाली है, जो सामान्यतः उपलब्ध नरम अवतरण परिपथ के रूप में काम करती है।

- **वास्तुकला और स्थान। प्रणाली में दो पैराफॉइल स्थान हैं:**

- एक **ऊपरी पिछले भाग में**;
- एक **ऊपरी अग्र भाग में**, नाक क्षेत्र के ठीक पीछे।

हर स्थान $N+1$ योजना—मुख्य और **आरक्षित** पैराफॉइल—में स्वतंत्र पैकिंग और खींचने वाली लाइनों के साथ बना है। पैराफॉइल धड़ से एक बिंदु पर नहीं, बल्कि भार-वहन फ्रेमों **पर अनुप्रस्थ जोड़-** रेखा से जुड़ते हैं। इससे स्थानीय भार-शिखर घटते हैं और पिच व रोल स्थिरता बढ़ती है। कैनोपी अनुदैर्घ्य अक्ष पर अलग-अलग रखे गए हैं, इसलिए वे एक-दूसरे को प्रभावित या उलझाते नहीं।

- **क्षेत्रफल और कार्य** -विन्यास। पैराफॉइल यान का पूरा भार उठाने के लिए नहीं, बल्कि अंतिम चरण में ऊर्ध्व वेग को मंद करने और सहज स्पर्श चरण बनाने के लिए हैं। अनुमानित पैरामीटर:

- एक मुख्य पैराफॉइल का क्षेत्रफल: लगभग 4,500–6,000 मी² ;
- दोनों पैराफॉइल चलने पर कुल सक्रिय क्षेत्रफल: लगभग 9,000–12,000 मी² ।

संपर्क के समय लक्षित ऊर्ध्व वेग है $-V_z \approx 1 \text{ m/s}$.

- **सक्रियण मानदंड** । पैराशूट-पैराफॉइल प्रणाली केवल **आवश्यकता पर चलती है** । अवतरण कलनविधि कुल **अतिभार—वायुगतिकीय**, जड़त्वीय और जल-गतिशील घटकों का सदिश योग—ध्यान में रखती है:

- यदि स्पर्श पर अनुमानित कुल अतिभार 4g से **अधिक नहीं** है, तो पंखों पर, **पैराफॉइल के बिना अवतरण** होता है;
- यदि **4g** पार होने का जोखिम हो, प्रणाली सक्रिय होकर ऊर्ध्व वेग को लक्ष्य मान तक घटाती है और अवतरण को मृदु ग्लाइड अवस्था में ले जाती है।
- **पुनःप्रयोग। पैराफॉइल**, लाइनें और जोड़-इकाइयाँ नियमित रखरखाव—निरीक्षण, सुखाना और शीघ्र घिसने वाले घटकों की अदला-बदली—के साथ बार-बार उपयोग के लिए बनी हैं; धड़ के भार-वहन ढाँचे को खोलना नहीं पड़ता।

4.3.6. स्वायत्त शक्ति और प्रणोदन संयंत्र

शटल पूरी तरह स्वायत्त ऊर्जा-प्रणोदन प्रणाली से लैस है, जो कक्षीय संचालन से लेकर कई महीनों की स्वायत्त समुद्री यात्रा तक पूरे मिशन चक्र के लिए बनाई गई है।

○ मूल ऊर्जा स्रोत : ऑनबोर्ड नाभिकीय रिएक्टर।

- **प्रकार:** अगली पीढ़ी का संहत तेज पिघला-लवण रिएक्टर या उच्च-ताप गैस-शीतित रिएक्टर। भविष्य में संहत संलयन मॉड्यूल—उदाहरण के लिए Helion Energy जैसी क्षेत्र-संपीड़न योजना—का उपयोग संभव है।
- **शक्ति:** विद्युत 10–20 MW; तापीय 50–100 MW।
- **उद्देश्य:** सभी ऑनबोर्ड प्रणालियों, चुंबकीय उत्तोलन के अतिचालक घटकों, विद्युतचुंबकीय प्लाज़्मा **इंजनों**, **सक्रिय शीतलन और स्वायत्त समुद्री प्रणोदकों को ऊर्जा देना। रिएक्टर शटल** के पूरे 5–10 वर्ष के सेवा-जीवन में ईंधन भरे बिना काम करने के लिए बनाया गया है।
- **ऑनबोर्ड अतिचालक उत्तोलन और स्थिरीकरण प्रणाली।** धड़ के साथ उच्च-ताप अतिचालकों पर आधारित अतिचालक चुंबकों वाले क्रायोजेनिक मॉड्यूल लगे हैं, जिन्हें ऑनबोर्ड प्रणालियों से द्रव नाइट्रोजन या हाइड्रोजन द्वारा ठंडा किया जाता है। ये चुंबक उत्तोलन और सक्रिय स्थिरीकरण—‘चुंबकीय निलंबन’—के लिए शक्तिशाली मुख्य क्षेत्र बनाते हैं। सुरंग की बाहरी बिजली पूरी तरह बंद हो जाए तब भी निष्क्रिय ‘रेल’ कुंडलियों के साथ प्रेरणीय क्रिया—‘चुंबकीय दर्पण’ प्रभाव—से शटल उत्तोलन बनाए रखता है।

स्थिरीकरण नियंत्रण प्रणाली पदानुक्रमित है:

- 1) **निष्क्रिय परिपथ** (माइक्रोसेकंड): सुरंग की कुंडलियों के साथ अतिचालकों का प्रेरणीय युग्मन किसी भी विस्थापन पर इलेक्ट्रॉनिकी के बिना स्वतः वापसी बल बनाता है।
- 2) **हार्डवेयर परिपथ** (माइक्रोसेकंड से मिलीसेकंड): विशेष FPGA और ASIC परिपथ असंतुलन पहचानते हैं और कठोर कलनविधियों से खंड बदलते हैं।
- 3) **सॉफ्टवेयर परिपथ** (मिलीसेकंड से दसियों मिलीसेकंड): सीमित AI-सहायता वाला ऑनबोर्ड कंप्यूटर धीमे बहाव और स्थानीय असंतुलन ठीक करने के लिए अतिचालक खंडों के बीच धारा पुनर्वितरित करता है; नैनोसेकंड प्रतिक्रिया की आवश्यकता नहीं होती।

यह वास्तुकला विक्षोभों पर मिलीसेकंड प्रतिक्रिया देती है, जो अतिध्वनिक वेग पर 15,000 टन के शटल की स्थिरता आवश्यकताओं से कई क्रम तेज है।

○ मुख्य इंजन: उच्च-प्रणोद विद्युतचुंबकीय प्लाज़्मा इंजन।

- **सिद्धांत:** ऑनबोर्ड रिएक्टर से चलने वाले चुंबक-प्लाज़्मा-गतिशील (MPD) या परिवर्ती विशिष्ट आवेग चुंबक-प्लाज़्मा रॉकेट (VASIMR)।
- **प्रणोद:** स्पंदित अवस्था में 50–100 kN (5–10 टन-बल) तक; कक्षा सुधार, कक्षा छोड़ने और अंतर-कक्षीय संक्रमण के लिए पर्याप्त।
- **कार्य-द्रव्य:** द्रव ज़ीनॉन, आर्गन या हाइड्रोजन का भंडार; हाइड्रोजन शीतलन प्रणालियों में भी प्रयुक्त होता है।
- **स्वायत्तता:** इंजन ऑनबोर्ड AI द्वारा नियंत्रित हैं, जो कक्षीय स्टेशनों से डॉकिंग, माल उतारने और वापसी के संचालन स्वयं गणना और पूरा कर सकता है।
- **ताप-नियंत्रण प्रणाली :**
 - **निकलने वाले रेडिएटर**। अंतरिक्ष में फैलने वाले द्रव-परिपथ पैनल, जो रिएक्टर और उपकरण की अतिरिक्त ऊष्मा निर्वात में छोड़ते हैं।

- **अवस्था-परिवर्तन ताप संचयक। निर्णायक** घटक, जो नाक और महत्वपूर्ण नोडों में स्थित हैं। वे प्रक्षेपण पर वायुमंडल भेदते और पुनःप्रवेश करते समय चरम ऊष्मा—मेगाजूल स्तर—सोखकर संरचना को अत्यधिक गर्म होने से बचाते हैं। अंतरिक्ष या समुद्र में यह ऊष्मा धीरे-धीरे रेडिएटर या परिवेश में निकलती है।
- **सक्रिय शीतलन प्रणाली।** उड़ान में ताप-कवच और निर्णायक घटकों के आपात शीतलन के लिए द्रव हीलियम/हाइड्रोजन वाला बंद परिपथ।
- **अतिरिक्त और सुरक्षा:** दोहरी रिएक्टर नियंत्रण प्रणालियाँ, स्वतंत्र शीतलन परिपथ और आपात ऊष्मा-विसर्जन साधन। संरचना समुद्र में गिरने सहित हर परिदृश्य में सुरक्षा देती है।

4.3.7. स्वायत्त अवतरण और समुद्री प्रणालियाँ

अटलांटिक के निर्धारित क्षेत्र में जल-अवतरण के बाद शटल पूरी तरह स्वायत्त समुद्री पोत की अवस्था में चला जाता है। इसके लिए निम्न प्रणालियाँ हैं:

- **प्रणोदन परिसर।** दो निकलने वाले अज़िमुथ थ्रस्टर या जल-जेट प्रणोदक, जो कम गति पर उच्च संचालन-क्षमता देते हैं।
- **समुद्री यात्रा की ऊर्जा।** प्रणोदकों और ऑनबोर्ड प्रणालियों को सामान्य ऑनबोर्ड **नाभिकीय/संलयन रिएक्टर न्यूनतम अवस्था** में विद्युत देता है। सक्रिय कोर में कई महीनों की स्वायत्त यात्रा के लिए पर्याप्त ऊर्जा है।
- **नौवहन और संचार।** उपग्रह (GPS/GLONASS) और जड़त्वीय नौवहन; सतही स्थिति पहचानने के लिए रडार और लाइडार; भूस्थिर उपग्रहों द्वारा स्थिर संचार।
- **अंतिम मंदन प्रणाली। पानी** छूने से ठीक पहले बची हुई 100–150 किमी/घंटा गति घटाने के लिए मिश्रित प्रणाली काम करती है : **स्थिरीकरण और आरंभिक मंदन** हेतु छोटा ड्रोग पैराशूट, तथा **ऊर्ध्व वेग के सटीक शमन हेतु मुख्य प्लाज़्मा** इंजनों का छोटा स्पंद। जल-अवतरण के बाद पैराशूट अलग कर दिया जाता है।

यह विन्यास शटल को अवतरण के बाद तत्काल **सहायता के बिना स्वयं अपने** गृह-बंदरगाह या टग से मिलने की जगह तक जाने देता है। वह तूफानी समुद्र में **स्वायत्त रह सकता है, लंबी** यात्राएँ कर सकता है और निर्धारित रखरखाव के लिए तय गोदी तक पहुँच सकता है—अंतरिक्ष यान से रोबोटिक समुद्री **पोत में परिवर्तित** होकर।

4.3.8. AstroLiner-S: आरंभिक / सरल संस्करण

StarRoad के आरंभिक कार्यान्वयन और मूल, तकनीकी रूप से सरल तथा संचालन में अधिक रूढ़िवादी विन्यास के लिए AstroLiner-S (Simplified / Start) आरंभिक शटल प्रस्तावित है।

यह AstroLiner का पूर्णतः कार्यक्षम, किंतु ऊर्जा और प्रणालियों की दृष्टि से सरल रूप है। इसे मार्ग के आरंभिक संचालन, शुरुआती मालवाहक और मानवयुक्त प्रक्षेपण, तथा प्रणाली के तकनीकी, संचालन और नियामक जोखिमों को चरणबद्ध घटाने के लिए बनाया गया है।

- **AstroLiner -S का मूल विचार।** यह StarRoad की केंद्रीय धारणा—वायुमंडल पर जड़त्वीय प्रहार—को साकार करता है, **लेकिन ऑनबोर्ड नाभिकीय या संलयन ऊर्जा स्रोत के बिना और मुख्य** संस्करण के प्रक्षेपण आयाम व द्रव्यमान को पूरी तरह बनाए रखते हुए।

सभी अत्यधिक ऊर्जा वाले संचालन—त्वरण, उत्तोलन और सुरंग में स्थिरीकरण—पूरी तरह भूमि-आधारित अवसंरचना में रखे गए हैं।

AstroLiner-S शटल:

- एक स्वायत्त परिवहन यान है;
- पूरी तरह पुनःप्रयोज्य है;
- स्वयं कक्षा में जाने, कक्षा छोड़ने और लौटने में सक्षम है;
- लेकिन सुरंग के बाहर केवल रासायनिक प्रणोदन इस्तेमाल करता है;
- और उस पर उच्च-शक्ति आयनीकरण विकिरण स्रोत नहीं हैं।
- **ऊर्जा और अतिचालक प्रणालियाँ। AstroLiner-S** विन्यास में पूरी तरह हटाए गए हैं:
 - नाभिकीय और संलयन ऊर्जा संयंत्र;
 - उनसे जुड़े विकिरण, तापीय और दुर्घटना जोखिम;

- सुरंग और प्रवेश-द्वार खंडों के अपरिवर्तनीय संदूषण के परिदृश्य।

उत्तोलन, स्थिरीकरण और मार्ग के साथ क्रिया करने वाले अतिचालक घटक:

- प्रक्षेपण से पहले धारा से आवेशित किए जाते हैं;
- स्थायी-धारा अवस्था में रखे जाते हैं;
- एक-दूसरे से पृथक हैं और ऑनबोर्ड प्रणाली से नियंत्रित होते हैं।

ऑनबोर्ड इलेक्ट्रॉनिक्स, नियंत्रण और सुरक्षा प्रणालियों को बैटरियों और जड़त्वीय संचयकों—फ्लाइव्हील—से शक्ति मिलती है, जिनमें पूरे सुरंग-त्वरण चक्र के लिए समय का आरक्षित मार्जिन है।

त्वरण के दौरान अतिचालक परिपथों का सक्रिय नियंत्रण छोटी सुधार-धाराओं और आपात अवस्थाओं तक सीमित है; इसलिए यान पर उच्च-शक्ति निरंतर ऊर्जा स्रोत की आवश्यकता नहीं होती।

कक्षा में मोड़कर रखे जाने वाले सौर पैनल सक्रिय ऊर्जा स्रोत होते हैं।

○ सुरंग के बाहर प्रणोदन

AstroLiner-S के सभी कक्षीय संचालन रासायनिक प्रणोदन से होते हैं।

शटल में हैं:

- मध्यम प्रणोद वाले मुख्य रासायनिक इंजन—LOX/LH₂ या LOX/LCH₄ श्रेणी;
- दोहरी अभिविन्यास और आपात नियंत्रण प्रणालियाँ (RCS)।

प्रणोदन प्रणाली निम्न कार्य करती है:

- वायुमंडल से निकलने के बाद लक्ष्य कक्षा तक अंतिम आरोहण;
- कक्षीय पैरामीटरों का सुधार;
- कक्षा से उतरना;
- नियंत्रित वायुमंडलीय पुनःप्रवेश और वापसी।

इस संस्करण में विद्युत और चुंबक-प्लाज़्मा इंजनों का त्याग ऑनबोर्ड उच्च-शक्ति विद्युत स्रोत न होने के कारण है; इसे पूरी प्रणाली की वास्तुकला की सीमा नहीं माना जाता।

○ वापसी और पुनःप्रयोग

AstroLiner-S सक्षम है:

- स्वायत्त रूप से कक्षा छोड़ने में;
- हल्के कोण पर नियंत्रित वायुमंडलीय पुनःप्रवेश में;
- वायुगतिकीय ग्लाइड में;
- पंखों और पैराशूट-पैराफॉइल प्रणाली से समुद्र में उतरने में।

रिएक्टर न होने से निम्न कार्य बहुत सरल होते हैं:

- समुद्री संचालन;
- नियत रखरखाव;
- असामान्य अवतरण के बाद यान की पुनर्प्राप्ति।

○ StarRoad के विकास में AstroLiner- S की भूमिका

AstroLiner-S को इस रूप में देखा जाता है:

- StarRoad शटल का पहला श्रृंखलाबद्ध संस्करण;
- प्रक्षेपण और विफलताओं के आँकड़े एकत्र करने का मंच;
- प्रणाली को जल्दी सेवा में लाने का साधन;
- आरंभिक कक्षीय अवसंरचना के लिए मूल परिवहन।

परियोजना के बढ़ने, संहत उच्च-शक्ति ऊर्जा स्रोत उपलब्ध होने और संचालन अनुभव संचित होने पर AstroLiner-S को क्रमिक रूप से पूर्ण AstroLiner से पूरित या प्रतिस्थापित किया जा सकता है, जिसमें उच्च-शक्ति ऑनबोर्ड ऊर्जा संयंत्र और विद्युतचुंबकीय प्लाज़्मा इंजन होंगे।

इसलिए AstroLiner-S कोई समझौता नहीं, बल्कि प्रणाली का तार्किक आरंभिक स्तर है। यह मुख्य मार्ग की बुनियादी वास्तुकला बदले बिना StarRoad का संचालन पहले, अधिक सुरक्षित और कम प्रणालीगत जोखिम के साथ शुरू करने देता है।

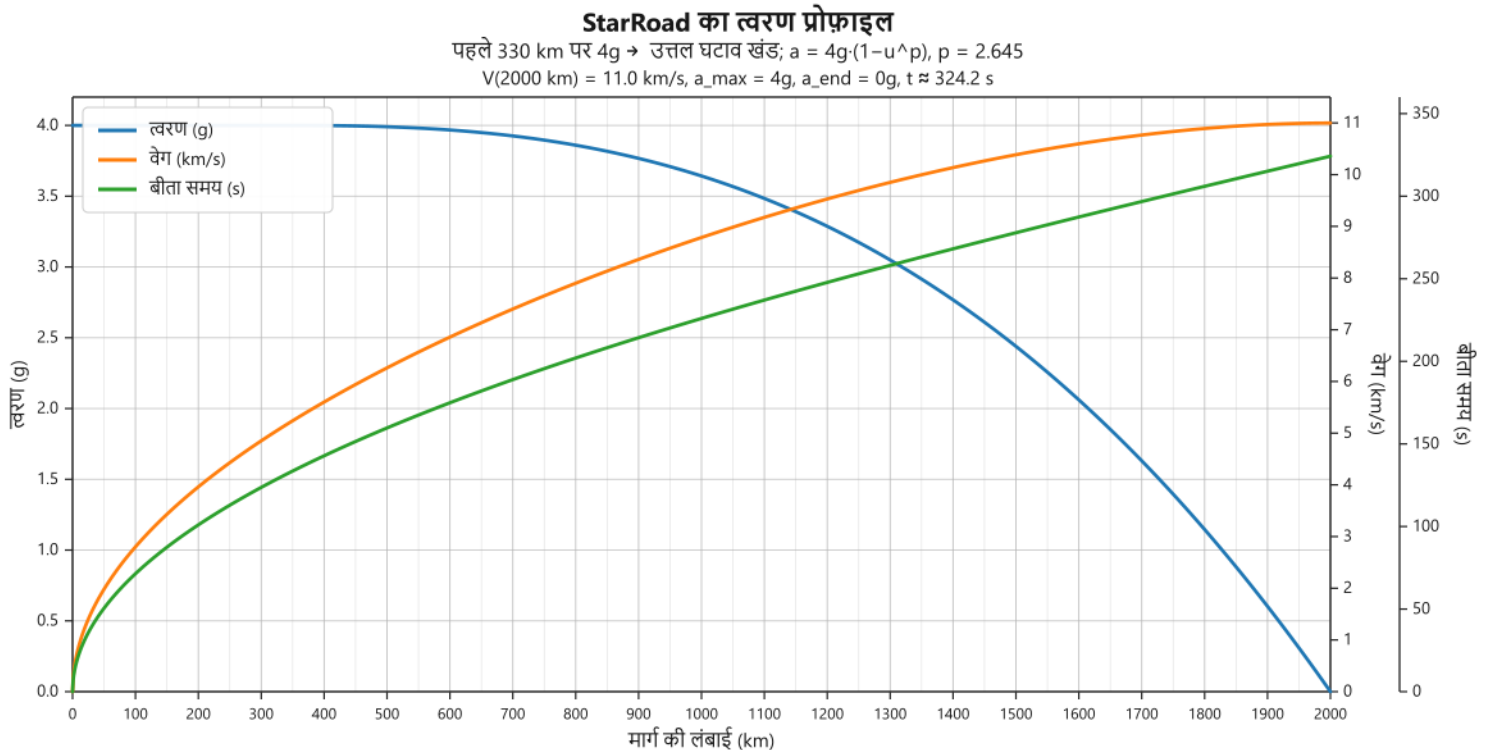
5. प्रक्षेपण तैयारी से उतरने के बाद रखरखाव तक संचालन चक्र

5.1. तैयारी और प्रक्षेपण

लदे हुए शटल को Batanga के पास प्रक्षेपण कक्ष में रखा जाता है। पहले शटल की ऑनबोर्ड प्रणालियों और फिर त्वरक प्रणालियों का परीक्षण होता है। इसके बाद गैस-गतिज प्रवेश-द्वार का प्रक्षेपण-पूर्व परीक्षण किया जाता है। ऑनबोर्ड अतिचालकों में धारा भरी जाती है, फिर चुंबकीय उत्तोलन चालू करके जाँचा जाता है। सुरंग पहले ही निर्वात में होती है। आदेश मिलते ही त्वरक के आरंभिक खंडों को स्पंदित ऊर्जा देना शुरू होता है।

5.2. सुरंग में त्वरण

- **0–330 किमी** । आरंभिक अनुदैर्घ्य त्वरण $\sim 4g$ है। ऊर्जा का बड़ा भाग उत्तोलन और गुरुत्व के विरुद्ध काम करने में लगता है।
- **330–~1,800 किमी, S-वक्र का नीचे जाता भाग**। अनुदैर्घ्य त्वरण आरंभिक $4g$ से धीरे-धीरे घटकर शून्य हो जाता है। भूमिगत वक्रों से गुजरते समय शटल पर $\sim 4g$ तक भार पड़ता है। आसपास के विद्युतचुंबकीय तत्व पथ को स्थिर रखते हैं।
- **~1,800–2,050 किमी, S-वक्र का ऊपर जाता भाग**। प्रवेश-द्वार के निकट पहुँचते हुए त्वरण शून्य हो जाता है। अंतिम 50 किमी में शटल ~ 11 किमी/सेकंड की गति से जड़त्व के सहारे चलता है।



5.3. वायुमंडलीय प्रवेश-द्वार से निकास

- ऊँचे प्रक्षेपण-बिंदु के कारण शटल प्रवेश-द्वार से केवल ~ 30 किमी दूर ही समुद्र तल से 10 किमी से अधिक ऊँचाई पर पहुँच जाता है, जिससे भूभाग पर आघात-तरंग का प्रभाव न्यूनतम रहता है। शटल के प्रक्षेपण से एक मिनट पहले यांत्रिक द्वार खोले बिना गैस-गतिज प्रवेश-द्वार के वलयों का परीक्षण किया जाता है। शटल के सुरंग मार्ग का 45% पार करने के बाद उन वलयों से संपीड़ित हवा का पराध्वनिक प्रवाह छोड़ा जाता है; यह हवा निर्वात बनाते समय सुरंग के अंतिम खंड के पंपों ने संचित की थी। शटल के गुजरने से ~ 10 सेकंड पहले हाइड्रोजन दिया जाता है और गैस-गतिज अवरोध को मुख्य दहन अवस्था में सक्रिय किया जाता है। इससे गर्म, आंशिक रूप से आयनित गैस का स्थिर, शंकाकार पराध्वनिक प्रवाह बनता है। वलयों के सफल सक्रियण और गर्म अवरोध-प्रवणता शंकु के बनने के 3 सेकंड बाद यांत्रिक प्रवेश-द्वार खोला जाता है।

- यह अवरोध सुरंग के निर्वात को टूटने से भी बचाता है और आरंभिक तापीय आघात को नरम करता है। शटल पहले से तैयार विरल और गर्म गैस-क्षेत्र को कुछ मिलीसेकंड में पार कर लेता है। यह प्रमुख तकनीक माध्यम बदलते समय अत्यंत अल्पकालिक आघात-मुख को हटाकर आरंभिक वायुगतिकीय प्रभाव की समय-रूपरेखा बदलती है।
- गैस-गतिज अवरोध कुल वायुगतिकीय बलों को कम नहीं करता। वह आघात-भार को माइक्रोसेकंड की सीमा से मिलीसेकंड की सीमा में फैला देता है, जिससे शटल संरचना में स्थानीय तनाव, कंपन और तापीय आघात निर्णायक रूप से घटते हैं।
- शटल गुजरते ही यांत्रिक द्वार खुलता है; उसके बाद जेट वलयों को बिना विलंब बंद किया जाता है।

5.4. वायुमंडल का पारगमन

शटल बैलिस्टिक पथ पर अपनी जड़त्वीय संहति और मजबूत संरचना का उपयोग करके वायुमंडल की सघन परतों को पार करता है। तापीय और गतिज भार पहले 10–20 सेकंड में चरम पर होते हैं।

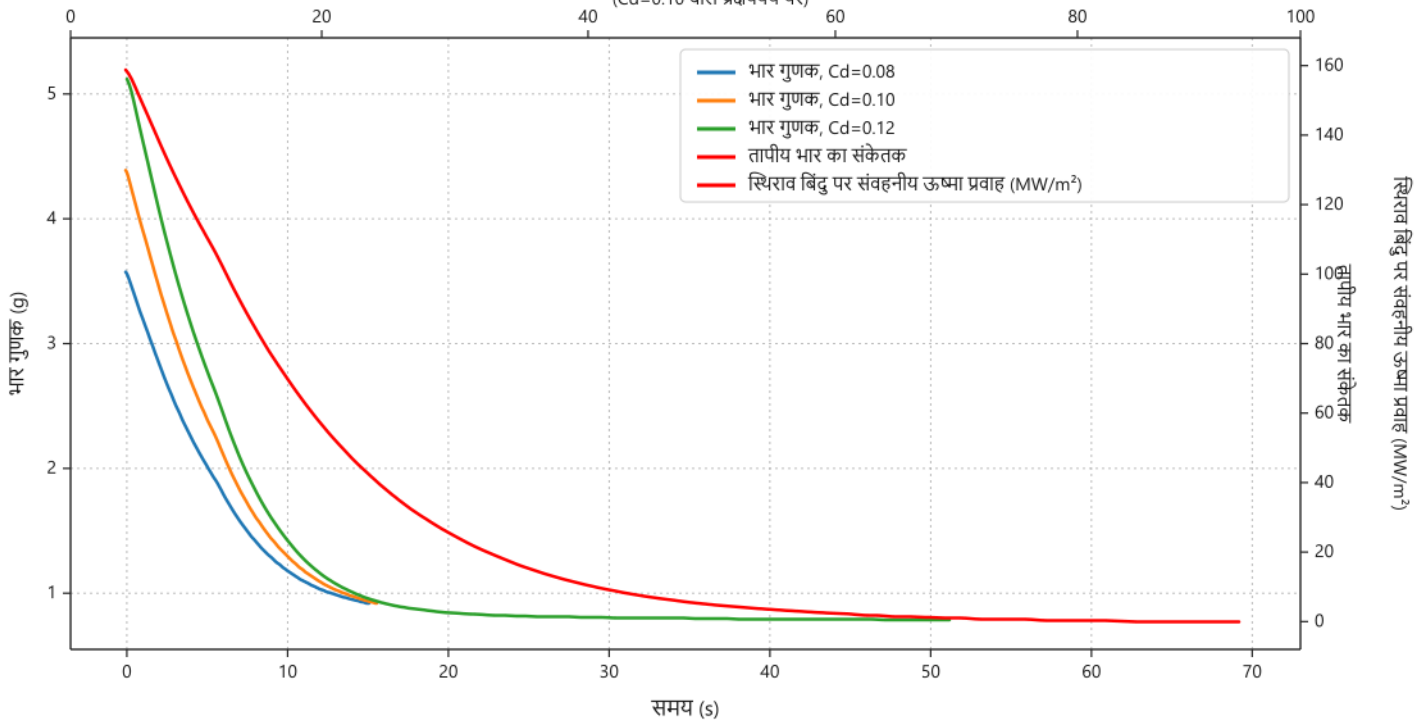
- **महत्वपूर्ण स्पष्टीकरण**। गैस-गतिज अवरोध क्षेत्र से निकलते ही शटल निर्धारित ~3,400 मीटर ऊँचाई पर सामान्य वायुमंडल के साथ पूरी तरह संपर्क में आ जाता है। पथ, ताप-प्रवाह और भार की सभी गणनाएँ वायुमंडल के साथ पूर्ण वायुगतिकीय संपर्क पर आधारित हैं; किसी “गैस कवच”, “मार्गिका” या शटल के साथ चलने वाले विरल आयतन की कल्पना नहीं की गई है।

StarRoad: समय और ऊँचाई के साथ यांत्रिक व तापीय भार

$C_d = 0.08, 0.10, 0.12$ (C_d वायुगतिकीय प्रतिरोध गुणांक है)

समुद्र तल से ऊँचाई (km)

($C_d=0.10$ वाले प्रक्षेपपथ पर)



5.5. अंतरिक्ष में प्रवेश और कक्षीय संचालन

वायुमंडल से निकलने के बाद ताप छोड़ने के लिए विकिरक खोले जाते हैं। फिर शटल सूक्ष्म पथ-संशोधन और लक्ष्य कक्षा तक पहुँचने के लिए ऑनबोर्ड विद्युतचुंबकीय प्लाज़्मा इंजन चालू करता है—अक्सर सीधे भूस्थिर कक्षा के पार या Lagrange बिंदुओं की ओर। इसके बाद उपयोगी भार तैनात किया जाता है। AstroLiner-S विन्यास में अंतिम कक्षा-प्रवेश और कक्षा-संशोधन रासायनिक प्रणोदन प्रणाली से किए जाते हैं।

5.6. कक्षा से बाहर निकलना और वापसी

पूर्ण-कार्यशील AstroLiner में कक्षा छोड़ने के लिए विद्युतचुंबकीय प्लाज़्मा इंजनों का उपयोग होता है। AstroLiner-S विन्यास में कक्षा छोड़ने का मंदन, संशोधन और अंतिम युद्धाभ्यास रासायनिक प्रणोदन प्रणाली से किए जाते हैं।

5.7. समुद्र में अवतरण

Gabon के पास अटलांटिक महासागर के ऊपर गति घटाने के लिए अवरोधी पैराशूट प्रणाली खोली जाती है। शटल छोटे आक्रमण-कोण पर अपने मजबूत निचले भाग के सहारे जलावतरण करता है; यह भाग गर्म सतह और ठंडे पानी के संपर्क के लिए बनाया गया है। जलावतरण के बाद प्रोपेलर या जल-जेट खोले जाते हैं।

5.8. खींचकर लाना और रखरखाव

ऑनबोर्ड रिएक्टर से चलने वाले अपने इंजन—या शटल प्रणालियाँ विफल होने पर तैयार खड़ी खींचने वाली नौकाएँ—यान को निरीक्षण, रखरखाव, ताप-कवच की मरम्मत और अगली उड़ान की तैयारी के लिए बंदरगाह परिसर तक पहुँचाते हैं। AstroLiner-S विन्यास में बंदरगाह वापसी बैटरियों, सहायक विद्युत इकाई या तैयार खींचने वाली नौकाओं से होती है।

6. कार्यान्वयन, समय-सारणी, आवश्यकताएँ और औद्योगिक केंद्र

6.1. परियोजना के चरण

StarRoad का कार्यान्वयन तकनीकी रूप से परस्पर जुड़े और आर्थिक रूप से औचित्यपूर्ण चरणों की श्रृंखला के रूप में नियोजित है। हर चरण के स्पष्ट उद्देश्य और सफलता के मानदंड हैं तथा वह अगले चरण के लिए आवश्यक अवसंरचना बनाता है, जिससे तकनीकी और वित्तीय जोखिम घटते हैं।

6.1.1. चरण 0: अवधारणा और परीक्षण (2–5 वर्ष)

- **उद्देश्य:** भौतिक सिद्धांतों का सत्यापन, प्रयोगशाला में महत्वपूर्ण तकनीकों का विकास और आगे की अभियांत्रिकी के लिए आधार तैयार करना।
- **मुख्य कार्य**
 1. त्वरण, पोर्टल संचालन और वायुगतिकीय आघात सहित सभी प्रक्रियाओं का विस्तृत गणितीय और CFD मॉडलन।
 2. अंतरराष्ट्रीय संघ का गठन और प्रारंभिक राजनीतिक व कानूनी समझौते।
 3. पूरे मार्ग पर भूवैज्ञानिक और पर्यावरणीय सर्वेक्षण।
 4. मुख्य स्थान से बाहर अनुसंधान परीक्षण स्थलों का निर्माण:
 - अतिचालक उत्तोलन मॉड्यूल और स्पंदित विद्युत-आपूर्ति प्रणालियों के बेंच परीक्षण;
 - स्थिर क्रमिक-दाब अवरोध बन सकने की पुष्टि के लिए गैस-गतिशील पोर्टल का 1:10 पैमाने का नमूना बनाकर परीक्षण;
 - निर्वात प्रणालियों, हल्की परीक्षण वस्तुओं के चुंबकीय त्वरण और सुरक्षा प्रणालियों के एकीकरण को सत्यापित करने हेतु 1–2 किमी लंबी छोटी निर्वात प्रदर्शन सुरंग की खुदाई।
- **सफलता मानदंड:** प्रवेश-द्वार, उत्तोलन और स्थिरीकरण जैसे मुख्य समाधानों की व्यवहार्यता सिद्ध करने वाले प्रयोगात्मक आँकड़े तथा चरण 1 के विस्तृत अभियांत्रिकी डिज़ाइन की तैयारी।

6.1.2. चरण 1: अवसंरचना और ऊर्जा आधार (5–7 वर्ष)

- **उद्देश्य:** परियोजना की 'ऊर्जा रीढ़' बनाना और वास्तविक स्थल-परिस्थितियों में रोबोटिक निर्माण विकसित करना।
- **मुख्य कार्य**
 1. 2 मीटर व्यास वाली मानकीकृत रोबोटिक सुरंग-वेधन प्रणालियों का लघु-श्रृंखला उत्पादन।
 2. प्रारंभिक ताप-स्थिरीकरण परिपथ बनाने के लिए भू-तापीय स्वायत्त ताप-ऊर्जा प्रणाली की मुख्य संग्राहक सुरंगों की पहली जोड़ी को पूरे मार्ग (~2,050 किमी) पर समानांतर खोदना।
 3. मार्ग के प्रमुख स्थानों पर प्रत्यक्ष वायु कार्बन ग्रहण (DAC) से प्राप्त अतिसंकट CO₂ पर चलने वाले पहले भू-तापीय संयंत्र बनाना।
 4. भू-तापीय संग्राहकों के ऊपर छोटी व्यास वाली परीक्षण-नमूना सुरंग—D=2 मीटर, L=2,050 किमी—खोदना, जिसमें बुनियादी निर्वात, संचार और सेवा प्रणालियाँ हों।

- **सफलता का मानदंड:** स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली का न्यूनतम विन्यास पूरी तरह कार्यशील और ऊर्जा-स्वायत्त हो; तेज रोबोटिक खुदाई की प्रक्रिया सिद्ध हो और आगे विस्तार का आधार बन जाए।

6.1.3. चरण 2: लघु-पैमाना सत्यापन ('वैज्ञानिक और उपकरण परिसर' का दर्जा) (4-6 वर्ष)

- **उद्देश्य:** वास्तविक गति पर प्रणालियों के तालमेल और सुरक्षा की जाँच तथा अद्वितीय प्रयोगात्मक आँकड़ों का संग्रह।
- **मुख्य कार्य**
 1. छोटी परीक्षण-सुरंग में कई टन तक के जड़ परीक्षण-पिंडों को 1-11 किमी/सेकंड की गति तक त्वरित और ब्रेक करना।
 2. छोटे प्रायोगिक शटल को गुजारकर 1:5 गैस-गतिक प्रवेश-द्वार नमूने का पूर्ण-पैमाने पर परीक्षण।
 3. अलग संरचना और ताप-सुरक्षा वाले परीक्षण-पिंडों को प्रक्षेपित करके 'जड़त्वीय प्रहारक' परिकल्पना की प्रयोगात्मक जाँच और अतिभार व ताप-प्रवाह के आँकड़े जुटाना।
 4. अतिचालक चुंबकों और ताप संचायकों सहित पूर्ण आकार के शटल की मुख्य प्रणालियों का विस्तृत डिज़ाइन और नमूना निर्माण शुरू करना।
- **सफलता का मानदंड:** सभी समकालिक प्रणालियाँ स्थिर और सुरक्षित चलें; गैस-गतिशील पोर्टल की प्रभावशीलता पुष्ट हो; प्रयोग से सिद्ध हो कि द्रव्यमान बढ़ने पर विशिष्ट भार घटता है; शटल का प्रारंभिक अभिकल्प पूरा हो।

6.1.4. चरण 3: पूर्ण-कार्यात्मक खंड और शटल नमूना (4-7 वर्ष)

- **उद्देश्य:** पर्याप्त लंबे खंड पर अंतिम विन्यास वाली प्रणालियों का एकीकरण और परीक्षण तथा उड़ान-योग्य नमूने का निर्माण।
- **मुख्य कार्य**
 1. मुख्य त्वरण सुरंग का 50-200 किमी लंबा पूर्ण-कार्यात्मक खंड, अंतिम 17.5×12.5 मी काट के साथ, सभी कुंडलियों, ऊर्जा भंडार और सेवा सुरंग सहित बनाना।
 2. इस खंड के नीचे भू-तापीय प्रणाली को पूर्ण सात-सुरंग विन्यास तक विस्तृत करना।
 3. बिना प्रणोदन के पूर्ण आकार के शटल नमूने का निर्माण और भूमि पर व्यापक परीक्षण—निम्न-ताप प्रणालियाँ, संरचनात्मक मजबूती और ताप-सुरक्षा।
 4. एकीकृत सुरंग परीक्षण: शटल-समान द्रव्यमानों का 8g तक के भार और ~4 किमी/सेकंड तक के वेग पर त्वरण और ब्रेकिंग। सभी आपात प्रोटोकॉल (चेतावनी 1-3) का सत्यापन।
 5. पूर्ण कार्यशील AstroLiner के लिए सघन ऑनबोर्ड परमाणु रिएक्टर का विकास, भूमि परीक्षण और प्रमाणन।
- **सफलता का मानदंड:** गंभीर क्षति के बिना बार-बार त्वरण और आपात-रोक चक्र पूरे हों; ऊर्जा पुनर्प्राप्ति की प्रभावशीलता पुष्ट हो; उड़ान शटल और रिएक्टर अंतिम एकीकरण के लिए तैयार हों।

6.1.5. चरण 4: लंबाई विस्तार और संचालन आरंभ (10-15 वर्ष)

- **उद्देश्य:** पहली लाइन का निर्माण पूरा करना, शटल का एकीकरण और परिचालन गति प्राप्त करना।
- **मुख्य कार्य**
 1. अनेक सुरंग-खनन मशीनों को समानांतर चलाकर त्वरण-सुरंग को चरणबद्ध ढंग से 2,050 किमी की अभिकल्प लंबाई तक बढ़ाना।
 2. पूरे मार्ग पर भू-तापीय प्रणाली की अवसंरचना और स्पंदित ऊर्जा-संचायकों का विस्तार।
 3. मोही पर्वत पर अंतिम उच्च-ऊँचाई वायुमंडलीय पोर्टल परिसर बनाना।
 4. शटल की ऑनबोर्ड प्रणालियों का एकीकरण तथा भूमि और सुरंग में कम गति के परीक्षण।
 5. गति और द्रव्यमान को क्रमशः बढ़ाते हुए प्रक्षेपण, जब तक 15,000 टन और ~11 किमी/सेकंड के डिज़ाइन मान न मिलें।
- **सफलता का मानदंड:** शटल का पहला सफल हाइपरसोनिक प्रक्षेपण पेलोड को लक्ष्य कक्षा में पहुँचाए; प्रति माह 1-2 प्रक्षेपण की अभिकल्प आवृत्ति हासिल हो।

6.1.6. चरण 5: विस्तार और औद्योगिक संचालन (निरंतर)

- **उद्देश्य:** StarRoad को निरंतर बढ़ती वैश्विक अवसंरचना में बदलना।
- **मुख्य कार्य**
 1. पहली लाइन का संचालन और माल चढ़ाने, सेवा तथा वापसी के रसद चक्रों का परिष्कार।
 2. माल-प्रवाह बढ़ाने के लिए दूसरी और बाद की समानांतर लाइनों का निर्माण शुरू करना।
 3. परियोजना के औद्योगिक केंद्रों के आधार पर कक्षीय जहाज़-निर्माण और प्रसंस्करण प्रतिष्ठान स्थापित करना।
 4. लोगों और विशेष माल के लिए छोटे त्वरकों वाली 'शाखाओं' का जाल विकसित करना।
- **सफलता का मानदंड:** कक्षा तक पहुँचाने की लागत \$10/किग्रा से कम हो; प्रतिदिन प्रक्षेपण हों; अगली मुख्य लाइनों की स्वीकृत योजना मौजूद हो और निर्माण शुरू हो चुका हो।

6.2. औद्योगिक केंद्र

- **तटीय परिसर (न्यांग्वा नदी मुहाना, गैबॉन):** शटल निर्माण, सुरंग के शुरुआती खंडों के मॉड्यूलों का उत्पादन और शटल रखरखाव का मुख्य गृह-बंदरगाह।
- **ऊँचाई वाला परिसर (मोही पर्वत और दक्षिणी पठार, कांगो लोकतांत्रिक गणराज्य):** उच्च-गति खंडों और अंतिम S-वक्र के मॉड्यूलों का उत्पादन तथा प्रवेश-द्वार तंत्र का संयोजन और रखरखाव। स्थल पर तीन-चैनल हाइड्रोजन विद्युत-अपघटन और भंडारण प्रणाली होगी; आपात स्थिति में भी हर चैनल अकेले प्रवेश-द्वार के गैस-गतिक अवरोध के तीनों इंजन वलयों को ईंधन दे सकता है। विद्युत-अपघटन की शक्ति परियोजना ग्रिड से जुड़ी स्थानीय भू-तापीय स्वायत्त ताप-ऊर्जा प्रणाली, जलविद्युत, सौर और नाभिकीय स्रोतों से मिलेगी।

6.3. समग्र समय-सीमा

परियोजना को अनेक उन्नत किंतु वर्तमान में व्यवहार्य तकनीकों और अभियांत्रिकी समाधानों, समानांतर काम करने वाली अनेक सुरंग-वेधन मशीनों, अवसंरचना स्थापना और दो उत्पादन केंद्रों की जरूरत है। इसलिए चरण 0 के आरंभ से चरण 4 के पहले वाणिज्यिक प्रक्षेपण तक पहली सुरंग के कार्यान्वयन में लगभग 25–40 वर्ष लगेंगे। यह ITER और LIGO जैसी अन्य महाविज्ञान परियोजनाओं के समय के तुल्य है। इन परिस्थितियों में प्रगति मूल तकनीकी व्यवहार्यता से अधिक वित्तपोषण और कूटनीतिक तथा कानूनी समन्वय पर निर्भर है। कार्य महत्वाकांक्षी है, पर वैश्विक संघ के लिए संभव हो सकता है।

7. संबोधित समस्याएँ और कार्य

7.1. वैश्विक अतितापन

तापीय प्रदूषण और पृथ्वी के जीवमंडल पर दबाव घटाने के लिए ऊर्जा-बहुल उद्योगों को अंतरिक्ष में ले जाना।

7.2. आर्थिक कार्य

अंतरिक्ष पहुँच लागत इतनी घटाना कि सौर ऊर्जा, क्षुद्रग्रह, चंद्र और अंततः ग्रहीय संसाधन आर्थिक हों।

7.3. रणनीतिक उद्देश्य

कक्षीय औद्योगीकरण और ग्रह रक्षा हेतु दृढ़, मौसम-स्वतंत्र उठान प्रणाली।

7.4. प्रौद्योगिकी उत्प्रेरक

परियोजना स्पंदित ऊर्जा, अतिचालकता, अतिध्वनिक तकनीक, नाभिकीय प्रणोदन और रोबोटिक सुरंग निर्माण बढ़ाएगी।

7.5. ऊर्जा और तापीय स्वायत्तता

स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली (स्वायत्त भू-तापीय प्रणाली) दोनों आवश्यकताओं को एक साथ पूरा करती है। यह लगभग 15 GW तक निरंतर विद्युत शक्ति पैदा करती है, त्वरक की पूरी माँग पूरी करते हुए व्यावसायिक अधिशेष देती है, और मुख्य सुरंग के आसपास अनुमानित ठंडा वातावरण बनाए रखती है। इससे गहरी, भू-तापीय रूप से सक्रिय चट्टानों में निर्माण और संचालन संभव होता है तथा असुरक्षित बाहरी उत्पादन और अनिश्चित मौसम पर निर्भरता समाप्त होती है।

7.6. कार्बन पदचिह्न

StarRoad सक्रिय पर्यावरणीय सेवा का मॉडल अपनाता है। परियोजना वायुमंडलीय CO₂ की दुनिया की सबसे बड़ी स्थिर उपभोक्ता है; अतिसांद्र अवस्था में यह भू-तापीय बंद चक्र का स्थायी कार्य-द्रव्य है। लाखों टन कार्बन डाइऑक्साइड वायुमंडलीय चक्र से हटाकर सदियों के लिए तकनीकी परिपथ में बंद की जाती है। इससे StarRoad ऐसा शक्तिशाली जलवायु-अभियांत्रिकी साधन बनता है जो पूरे औद्योगिक क्षेत्रों के कार्बन उत्सर्जन की भरपाई कर सकता है।

7.7. जल-तापीय मुख्य नहर की सामाजिक और पर्यावरणीय क्षमता

जल-तापीय मुख्य नहर केवल भू-तापीय शीतलन का हिस्सा नहीं, बल्कि क्षेत्र को लाभ देने वाली दोहरे उपयोग की महाद्वीपीय अवसंरचना है:

- **सिंचाई। निकास** अवरोधों से नहर का पानी मार्ग के साथ कृषि भूमि की सिंचाई में लगाया जा सकता है और शुष्क क्षेत्रों को अफ्रीका की 'हरित पट्टी' में बदला जा सकता है।
- **प्राकृतिक पुनर्भरण।** बार-बार होने वाली भूमध्यरेखीय वर्षा नहर को स्वतः भरती है।
- **तापीय जल का उपचार। भू-तापीय** ताप-विनिमायक पानी को +60°C तक गर्म करते हैं; इसके बाद वह प्रभावी रूप से पाश्चुरीकृत होता है और सुरक्षित सिंचाई, औद्योगिक उपयोग तथा छनाई के बाद घरेलू और पेयजल उपयोग के लिए उपयुक्त बन जाता है।
- **गुरुत्वीय प्रवाह।** भूभाग की प्राकृतिक ढाल—पूर्व में 3,400 मी से पश्चिम में 0 मी—के कारण पानी बिना पंप के स्वयं बहता है और निःशुल्क परिसंचरण देता है।
- **सूक्ष्म जलविद्युत।** नहर के ऊँचाई-अंतर पर सूक्ष्म जलविद्युत संयंत्रों की श्रृंखला लगाकर स्थानीय ग्रिड और आत्मनिर्भरता के लिए अतिरिक्त नवीकरणीय ऊर्जा बनाई जा सकती है।

इस प्रकार StarRoad केवल परिवहन नहीं, बल्कि क्षेत्र के सतत विकास में एकीकृत कृषि-ऊर्जा मंच भी बनता है।

7.8. ऊर्जा नेटवर्क

स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली और विद्युत संयंत्रों का नेटवर्क त्वरक के साथ आसपास के शहरों, उद्योगों और खेतों को भी अतिरिक्त 'हरित' ऊर्जा देता है।

7.9. आर्थिक धमनी के रूप में StarRoad

एक ओर StarRoad सौरमंडल विकास का ग्रहीय माल गेटवे, दूसरी ओर अफ्रीका की मुख्य आर्थिक धमनी और औद्योगीकरण, ऊर्जा स्वतंत्रता व खाद्य सुरक्षा का उत्प्रेरक बनता है। यह कहीं न जाने वाली भूमिगत रचना नहीं। 40 टर्मिनल, गैबॉन और कांगो लोकतांत्रिक गणराज्य के दो औद्योगिक केंद्र, जलतापीय मुख्य नहर और सड़क नेटवर्क मध्य अफ्रीका को पश्चिम-पूर्व काटता 2,050 किमी लंबा रैखिक सतत-विकास समूह बनाते हैं। पारिस्थितिक, तकनीकी और कृषि परिदृश्य के इस आत्मनिर्भर क्षेत्र में:

- भूतापीय, लघु जलविद्युत और सौर ऊर्जा बनती है;
- सिंचित कृषि से भोजन उगता है;
- शटल घटक, सुरंग मॉड्यूल और उपकरण बनते हैं;
- सड़क और रेल से माल चलता है;
- प्रक्षेपण परिसर और वायुमंडलीय गेटवे वाला अंतरिक्ष बंदरगाह चलता है;
- प्रत्यक्ष वायु-पकड़ केंद्र CO₂ हटाते हैं।

7.10. महत्वपूर्ण अवसंरचना की सुरक्षा

परियोजना में शुरुआत से ही बड़ी मात्रा में हाइड्रोजन, अतिध्वनिक गति और गीगावॉट स्तर की ऊर्जा के सुरक्षित संचालन के उपाय शामिल हैं। निष्क्रिय सुरक्षा को सक्रिय निगरानी और स्वचालित प्रतिक्रिया के साथ जोड़ा गया है, जिससे बड़े ऊर्जा प्रतिष्ठानों और हाइड्रोजन प्रणालियों के लिए नया सुरक्षा मानक बनता है।

7.11. स्थल चयन और विस्तार क्षमता

परियोजना को ऐसा पोर्टल स्थल चाहिए जो ऊँचाई, रसद, सुरक्षा, विस्तार क्षमता और कानून जैसी दर्जनों परस्पर विरोधी शर्तें पूरी करे। मोही पर्वत और पास का पठार StarRoad को छोटे उच्च-ऊँचाई स्थल से आरंभ होकर स्थान बदले बिना दुनिया के सबसे बड़े अंतरिक्ष-बंदरगाह में बढ़ने देते हैं।

7.12. महाद्वीपीय परियोजना का राजनीतिक और कानूनी समन्वय

तीन देशों का मार्ग CERN और ITER जैसे अंतरराष्ट्रीय संघ से संचालित होगा। भूतापीय स्वायत्त तापीय ऊर्जा प्रणाली की भूमिगत अवसंरचना और ऊर्जा संपत्ति को विशेष कानूनी दर्जा और लाभ का स्पष्ट बँटवारा मिलेगा। परियोजना राजनीतिक स्थिरता मानने वाला बोझ नहीं; परस्पर निर्भरता और भावी निर्माण-तकनीक तक विशेष पहुँच से स्थिरता बनाने और बनाए रखने का मूल्यवान साधन है।

7.13. माल प्रवाह का क्रमिक विकास

कक्षीय उद्योग के साथ दर बढ़ती है: मासिक अग्रणी चरण शिपयार्ड बनाता, सप्ताह में 1-3 का औद्योगिक चरण संपत्ति बनाता और दैनिक परिपक्व चरण अंतरिक्ष अर्थव्यवस्था की घातीय वृद्धि चलाता है।

8. बाज़ार और कक्षीय रसद

यह खंड StarRoad की आर्थिक व्यवहार्यता के केंद्रीय प्रश्न का उत्तर देता है: अतिभारी प्रक्षेपण गलियारे का पूरा उपयोग करने लायक मात्रा में क्या भेजा जाए। StarRoad दुर्लभ, एकबारगी अभियानों की प्रणाली नहीं है। इसका लक्ष्य पृथ्वी और उच्च कक्षाओं के बीच बड़े पैमाने का नियमित औद्योगिक माल प्रवाह है।

StarRoad का मुख्य आरंभिक बाज़ार निम्न पृथ्वी कक्षा के उपग्रह समूह या अलग वैज्ञानिक यान नहीं, बल्कि विशाल कक्षीय ऊर्जा, संगणन अवसंरचना, अंतरकक्षीय रसद, कक्षीय बस्तियाँ, शिपयार्ड और उनसे आगे विकसित होने वाले पृथ्वी-बाह्य उद्योग हैं।

8.1. अतिभारी प्रक्षेपणों की माँग का प्रश्न

पारंपरिक रॉकेट अर्थशास्त्र केवल प्रति किलोग्राम लागत से नहीं, बल्कि प्रक्षेपण की प्रकृति से भी सीमित है: रॉकेट सहायक द्रव्यमान के बड़े अनुपात, जटिल कक्षीय संयोजन और अनेक अलग-अलग कार्रवाइयों के साथ माल को छोटे-छोटे खेपों में पहुँचाते हैं। कीमत घटने पर भी रॉकेट परिवहन अभियान-आधारित रसद ही रहता है।

StarRoad अलग प्रकार का बाज़ार बनाता है। इसका उद्देश्य आज के पेलोड को केवल सस्ता भेजना नहीं, बल्कि उन पेलोड को संभव बनाना है जो रॉकेट रसद में कभी आर्थिक नहीं हो सकते।

इन पेलोड में शामिल हैं:

- पूर्ण या लगभग पूर्ण गीगावाट-श्रेणी के अंतरिक्ष सौर विद्युत केंद्र;
- बड़े कक्षीय डेटा केंद्र;
- माइक्रोवेव विद्युत-प्रेषण मॉड्यूल;
- बड़े ट्रेस, रेडिएटर, दर्पण और पैनल;
- कक्षीय शिपयार्ड और स्वचालित संयोजन लाइनें;
- EML4/5 के आवासीय और औद्योगिक मॉड्यूल;
- अंतरकक्षीय टग और परिवहन यान;
- प्रणोदक, ऊर्जा और सेवा मॉड्यूल;
- भावी क्षुद्रग्रह और अंतरग्रहीय अवसंरचना के घटक।

इसलिए StarRoad वर्तमान अंतरिक्ष-प्रक्षेपण बाज़ार पर निर्भर नहीं है। जैसे रेल, कंटेनर जहाज़रानी और विद्युत ग्रिड ने केवल मौजूदा माँग पूरी नहीं की बल्कि अपने इर्द-गिर्द नई अर्थव्यवस्थाएँ बनाई, वैसे ही यह नया बाज़ार बनाता है।

8.2. आरंभिक बाज़ार: अंतरिक्ष सौर ऊर्जा और कक्षीय डेटा केंद्र

पहले चरण में StarRoad का मुख्य वाणिज्यिक और रणनीतिक माल गीगावाट-श्रेणी के अंतरिक्ष सौर विद्युत केंद्र होने चाहिए। ये बड़े, स्वतः या आंशिक रूप से स्वतः खुलने वाले ऊर्जा मंच हैं जिन्हें AstroLiner-S सीधे लक्ष्य कक्षा या कार्यस्थल तक पहुँचाता है।

अंतरिक्ष सौर विद्युत केंद्र कई आवश्यकताएँ एक साथ पूरी करते हैं:

- अतिभारी प्रक्षेपणों की बड़े पैमाने की दोहरावदार माँग बनाते हैं;
- दिन-रात चक्र और अधिकांश मौसम से स्वतंत्र ऊर्जा बाज़ार बनाते हैं;
- नई उत्पादन क्षमता का बड़ा भाग पृथ्वी की सतह से बाहर लगाने देते हैं;
- कक्षीय उद्योग को ऊर्जा देने की नींव रखते हैं;
- कक्षीय रसद, शिपयार्ड और सेवा बस्तियाँ बनाने का आर्थिक कारण देते हैं।

पृथ्वी की कक्षा में सौर स्थिरांक लगभग **1,361.6 W/m²** है। अतः 1 गीगावाट आपतित सूर्यप्रकाश के लिए पूरी तरह उन्मुख संग्राहक क्षेत्र लगभग 0.74 किमी² चाहिए। 25–35% फोटोवोल्टिक दक्षता, रूपांतरण व प्रेषण हानि, संरचनात्मक अंतराल, रेडिएटर, विद्युत इलेक्ट्रॉनिक्स, अतिरेक और क्षय को जोड़ने पर 1 GW उपयोगी बिजली के लिए वास्तविक क्षेत्र कई वर्ग किमी हो जाता है। पारंपरिक अंतरिक्ष यान के लिए यह बड़ा है, पर StarRoad में स्वाभाविक है, जहाँ द्रव्यमान, क्षेत्र और संरचनात्मक आकार मुख्य बाधा नहीं रहते।

8.2.1. गीगावाट-श्रेणी की अंतरिक्ष सौर ऊर्जा के द्रव्यमान संदर्भ

गीगावाट-श्रेणी का विद्युत केंद्र छोटा उपग्रह नहीं है। आशावादी आधुनिक रचनाओं में भी 2 GW केंद्र का द्रव्यमान कई हजार टन है। CASSIOPEIA जैसी सबसे हल्की संकल्पना लगभग 2,000 टन आँकी गई है, जबकि अधिक रूढ़िवादी NASA अध्ययन समान 2 GW प्रणाली को 5,900–10,000 टन बताते हैं।

परियोजना / अध्ययन	शक्ति	द्रव्यमान	StarRoad के लिए प्रासंगिकता
CASSIOPEIA / Space Energy Initiative / Frazer-Nash	ग्रिड को अधिकतम 2 GW	लगभग 2,000 टन	StarRoad का सर्वाधिक प्रासंगिक संदर्भ: GEO/GSO, 99.7% उत्पादन गुणक, एक उपग्रह-एक रेक्टोना संरचना और सर्वोत्तम दशा में लगभग 1 MW/t विशिष्ट शक्ति।
NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm	ग्रिड को 2 GW	लगभग 5,900 टन	अधिक रूढ़िवादी अनुमान। NASA प्रणाली को ग्रिड पर 2 GW के अनुसार मापता है; RD1 में लगभग 11.5 किमी ² सौर पैनल हैं।
NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array	ग्रिड को 2 GW, पर कई प्रणालियों से	लगभग 10,000 टन	NASA लगभग 1 करोड़ किग्रा द्रव्यमान और 19 किमी ² सौर-पैनल क्षेत्र बताता है। RD2 कम समय उत्पादन करता है, इसलिए एक RD1 जितनी ऊर्जा के लिए पाँच RD2 चाहिए।
JAXA / Sasaki Tethered-SPS	0.75 GW औसत / 1.2 GW अधिकतम	प्रति प्रणाली लगभग 20,000 टन	भारी संदर्भ। औसत 2 GW तक मोटे अनुपात में लगभग 50,000+ टन बनते हैं, इसलिए यह एक प्रक्षेपण नहीं बल्कि अनेक उड़ानों और कक्षीय संयोजन का कार्य है।
Caltech SSPP / हल्की मॉड्यूलर टाइल	पूर्ण 2 GW केंद्र नहीं, तकनीकी इकाई	केवल सक्रिय परत, पृथ्वी पर 2 GW के लिए सैद्धांतिक रूप से लगभग 1,700–3,400 टन	160 g/m ² और 7–14% समग्र दक्षता वाला यह अनुमान केवल सक्रिय परत का है। पूर्ण केंद्र को संरचना, विद्युत प्रेषण, अभिविन्यास नियंत्रण, रेडिएटर, तार, इलेक्ट्रॉनिक्स, रखरखाव व्यवस्था और भंडार भी चाहिए।

तालिका का केंद्रीय निष्कर्ष है: **2,000–10,000 टन का 2 GW अंतरिक्ष सौर विद्युत केंद्र AstroLiner की भूमिका में लगभग ठीक बैठता है।** StarRoad में यह एक अतिभारी प्रक्षेपण या न्यूनतम कक्षीय संयोजन वाली कुछ उड़ानें हैं। रॉकेट रसद में दर्जनों या सैकड़ों अतिभारी रॉकेट प्रक्षेपण, ईंधन-भराई शृंखला, कक्षीय संयोजन, GEO या EML तक खिंचाई और बहुत अधिक संचालन जटिलता चाहिए।

8.2.2. एक 2 GW अंतरिक्ष सौर विद्युत केंद्र की ऊर्जा उपज

आधारभूत मान्यताएँ:

- ग्रिड को दी गई शक्ति: **2 GW**;
- उपलब्धता / उत्पादन गुणक: **99.7%**;
- डिज़ाइन आयु: **30 वर्ष**;

एक केंद्र का उत्पादन:

- लगभग **17.47 TWh** प्रति वर्ष;
- **30 वर्षों में** लगभग 524 TWh।

इससे प्रति किलोग्राम परिवहन लागत निर्णायक बनती है। रॉकेट रसद में प्रक्षेपण मुख्य बाधा रहता है; StarRoad में परिवहन भाग भविष्य की ऊर्जा कीमत का छोटा अंश बन जाता है।

8.2.3. अंतरिक्ष सौर ऊर्जा लागत का परिवहन भाग

नीचे का आकलन केवल **समतलीकृत ऊर्जा लागत के परिवहन** भाग को दिखाता है: केंद्र पहुँचाने की लागत को 30 वर्षों के कुल ऊर्जा उत्पादन से विभाजित किया गया है। इसमें केंद्र निर्माण, रेक्टैना, रखरखाव, बीमा, मॉड्यूल बदलना, भू-अवसंरचना और संचालक लाभ शामिल नहीं हैं।

सूत्र:

LCOE का परिवहन भाग = केंद्र का द्रव्यमान × वितरण लागत / जीवनकाल ऊर्जा उत्पादन

99.7% उपलब्धता और 30 वर्ष आयु वाले 2 GW केंद्र का जीवनकाल उत्पादन लगभग 524 **अरब kWh** है।

चरण / परिवहन प्रणाली	वितरण लागत	CASSIOPEIA-सदृश केंद्र, 2,000 टन, €/kWh	NASA RD1, 5,900 टन, €/kWh	NASA RD2, 10,000 टन, €/kWh
वर्तमान रॉकेट रसद, GTO का निचला संदर्भ	\$3,600– 5,600/kg	1,37–2,14	4,05–6,31	6,87–10,69
StarRoad, वर्ष 1–2	\$80–120/kg	0,0305–0,0458	0,0901–0,1351	0,1527–0,2290
StarRoad, वर्ष 3–5	\$30–50/kg	0,0114–0,0191	0,0338–0,0563	0,0572–0,0954
StarRoad, वर्ष 6–10	\$10–20/kg	0,0038–0,0076	0,0113–0,0225	0,0191–0,0382
StarRoad, वर्ष 11–15	\$3–8/kg	0,0011–0,0031	0,0034–0,0090	0,0057–0,0153
StarRoad, वर्ष 16–25	\$0.8–3/kg	0,0003–0,0011	0,0009–0,0034	0,0015–0,0057
StarRoad, वर्ष 26+	\$0.3–1/kg	0,0001–0,0004	0,0003–0,0011	0,0006–0,0019

तुलना में, आज के नए स्थलीय उत्पादन की LCOE कई सेंट प्रति kWh है: तटवर्ती पवन लगभग 3–4 €/kWh, बड़े सौर संयंत्र 4–5 €/kWh और जलविद्युत 5–6 €/kWh। 2050 के स्थलीय विकल्पों का NASA अनुमान लगभग 2–5 €/kWh है।

महत्वपूर्ण निष्कर्ष यह है कि प्रायोगिक काल में भी अंतरिक्ष सौर ऊर्जा का StarRoad परिवहन भाग स्थलीय LCOE से दस गुने से अधिक कम है; परिपक्व चरण में वह प्रमुख मूल्य घटक लगभग नहीं रहता। इसका अर्थ यह नहीं कि कुल अंतरिक्ष सौर लागत सेंट के हजारवें भाग होगी। केंद्र और रेक्टैना निर्माण, सेवा, इलेक्ट्रॉनिक्स, रेडिएटर, मॉड्यूल प्रतिस्थापन, बीमा और लाभ बाकी रहते हैं। StarRoad वह विशिष्ट बाधा हटाता है जो रॉकेट रसद में अंतरिक्ष सौर ऊर्जा को महंगा बनाती है।

आज के रॉकेट परिदृश्य में वास्तविक स्थिति \$3,600–5,600/kg के सरल आँकड़े से भी खराब है। बड़े केंद्र को कक्षा में भेजने के साथ कार्यस्थल तक ले जाना, जोड़ना और सँभालना पड़ता है; टग में ईंधन भरना और अवसंरचना बनाए रखना पड़ता है। इसलिए NASA की आधार **LCOE** RD1 के लिए लगभग **61 €/kWh** और RD2 के लिए 159 €/kWh है। StarRoad केवल प्रक्षेपण लागत नहीं घटाता; हजारों रॉकेट कार्गोवाइयों को एक या कुछ अतिभारी अवसंरचना उड़ानों से बदलकर समस्या का वर्ग बदल देता है।

8.2.4. दूसरा आरंभिक बाज़ार: कक्षीय डेटा केंद्र

कक्षीय डेटा केंद्र दूसरा आरंभिक बाज़ार बन सकते हैं। कृत्रिम बुद्धिमत्ता, क्लाउड संगणन और डिजिटल अवसंरचना की वृद्धि से डेटा केंद्र वैश्विक ऊर्जा माँग का बड़ा भाग बन रहे हैं। IEA के अनुसार वे पहले ही सालाना सैकड़ों TWh लेते हैं और अगले दशक में लगभग 1,000 TWh प्रति वर्ष तक पहुँच सकते हैं।

संगणन अवसंरचना का भाग अंतरिक्ष सौर केंद्रों के पास रखने के लाभ:

- निरंतर कक्षीय उत्पादन तक सीधी पहुँच;
- स्थलीय विद्युत ग्रिड पर कम माँग;
- निर्वात में बड़े रेडिएटर क्षेत्र बनाने की क्षमता;
- भूमि, पानी और ग्रिड क्षमता जैसी स्थानीय सीमाओं पर कम निर्भरता;
- सौर केंद्रों के साथ ऊर्जा, संचार और सेवा अवसंरचना साझा करना।

आरंभिक चरण में कक्षीय विद्युत केंद्र और डेटा केंद्र अलग मंचों या संयुक्त ऊर्जा-संगणन परिसरों के रूप में भेजे जा सकते हैं, जिनमें सौर केंद्र, विद्युत इलेक्ट्रॉनिक्स, रेडिएटर, संगणन मॉड्यूल, संचार एंटीना और माइक्रोवेव प्रेषण परिपथ हों।

8.3. अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा का जलवायु और औद्योगिक औचित्य

अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा संयंत्रों को केवल 'हरित' तकनीक कहना गलत होगा। उनकी भूमिका कहीं व्यापक है: वे आराम घटाए और उपभोग-सीमा लगाए बिना, अधिक शक्तिशाली ऊर्जा प्रणाली बनाकर कार्बन-आधारित उत्पादन की जगह ले सकते हैं।

पारंपरिक जलवायु नीति को अक्सर ऐसा माना जाता है मानो वह उत्सर्जन घटाने के लिए समाज से सुविधा छोड़ने को कहती हो। StarRoad दूसरा रास्ता देता है: सभ्यता की क्षमता घटाने के बजाय अधिकांश नया उत्पादन अंतरिक्ष में लगाना और विद्युत क्षेत्र का कार्बन उत्सर्जन बढ़ाए बिना उपलब्ध ऊर्जा बढ़ाना।

इस मॉडल में औद्योगिक संसाधन के रूप में हाइड्रोजन समाप्त करने की आवश्यकता नहीं है। उन्हें बड़े पैमाने की बिजली और ताप उत्पादन से क्रमशः हटाकर रसायन, सामग्री, कार्बन कंपोजिट, कृत्रिम उत्पाद और उन उत्पादन श्रृंखलाओं में लगाया जा सकता है जहाँ कार्बन ईंधन नहीं, कच्चा माल है।

आज के कार्बन-ऊर्जा उद्योगों के लिए यह केवल खतरा नहीं, संक्रमण का मार्ग भी है। तेल, गैस और कोयला अवसंरचना से जुड़े उद्यमों, राज्यों और कोषों को अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा, कक्षीय ऊर्जा, हाइड्रोजन रसायन और कार्बन सामग्री में प्राथमिक निवेश अवसर दिए जा सकते हैं। तब StarRoad स्थापित ऊर्जा उद्योगों का केवल प्रतिद्वंद्वी नहीं, उनके नियंत्रित रूपांतरण का माध्यम बनेगा।

8.3.1. ऊर्जा प्रतिस्थापन का पैमाना

एक गीगावॉट निरंतर विद्युत शक्ति एक वर्ष में लगभग 8.76 TWh ऊर्जा देती है। 99.7% उपलब्धता पर चलने वाला 2 GW का अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा संयंत्र एक वर्ष में लगभग **17.47 TWh देता है।**

अर्थात:

- 100 GW कक्षीय उत्पादन से लगभग 876 TWh प्रति वर्ष;
- 1 TW कक्षीय उत्पादन से लगभग 8,760 TWh प्रति वर्ष;
- 3 TW कक्षीय उत्पादन से लगभग **26,280 TWh** प्रति वर्ष—वर्तमान विश्व की वार्षिक विद्युत खपत के तुलनीय।

2024 में वैश्विक विद्युत उत्पादन लगभग 30.8 हजार TWh था, जिसमें जीवाश्म स्रोतों का हिस्सा करीब 18.2 हजार TWh था। पैमाना स्पष्ट है: कार्बन-आधारित उत्पादन को आंशिक रूप से बदलने के लिए भी दसियों नहीं, सैकड़ों या हजारों गीगावॉट नई भरोसेमंद क्षमता चाहिए।

8.3.2. जब StarRoad के प्रक्षेपण अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा संयंत्र ले जाएँ, तब संभावित प्रतिस्थापन दर

तालिका एक ऊपरी तकनीकी अनुमान देती है: यदि StarRoad के प्रक्षेपणों का बड़ा भाग हर उड़ान में ग्रिड से जुड़ने वाला एक 2 GW संयंत्र पहुँचाए तो क्या होगा। यह न भविष्यवाणी है, न वादा। यह केवल तब संभव दर बताती है जब अन्य शर्तें भी पूरी हों—श्रृंखलाबद्ध उत्पादन, तैयार रेक्टेना और ग्रिड जोड़, राजनीतिक व कानूनी स्वीकृति, वित्तपोषण, रखरखाव और उत्पादन सोख सकने वाले ऊर्जा बाजार।

StarRoad संचालन की अवधि	आर्थिक मॉडल में प्रति वर्ष प्रक्षेपण	प्रति वर्ष नई अंतरिक्ष-सौर क्षमता	स्थापना के बाद नया वार्षिक उत्पादन	2024 में जीवाश्म-ईंधन से विद्युत उत्पादन, ≈18.2 हजार टेरावाट-घंटा/वर्ष	2024 में कुल विश्व विद्युत उत्पादन, ≈30.8 हजार टेरावाट-घंटा/वर्ष
वर्ष 1-2	12-24	24-48 GW/वर्ष	210-419 TWh/वर्ष	1,2-2,3%	0,7-1,4%
वर्ष 3-5	50-100	100-200 GW/वर्ष	873-1,747 TWh/वर्ष	4,8-9,6%	2,8-5,7%
वर्ष 6-10	200-300	400-600 GW/वर्ष	3,493-5,240 TWh/वर्ष	19-29%	11-17%
वर्ष 11-15	500-700	1,000-1,400 GW/वर्ष	8,734-12,227 TWh/वर्ष	48-67%	28-40%
वर्ष 16-25	1000+	2,000+ GW/वर्ष	17,467+ TWh/वर्ष	96%+	57%+
वर्ष 26+	1500+	3,000+ GW/वर्ष	26,201+ TWh/वर्ष	144%+	85%+

तालिका बताती है कि अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा StarRoad का स्वाभाविक प्राथमिक बाजार क्यों है। प्रति प्रक्षेपण एक 2 GW संयंत्र हो तो शुरुआती संचालन भी उल्लेखनीय ऊर्जा प्रवाह बनाता है; परिपक्व संचालन ग्रह-स्तरीय साधन बन जाता है।

तालिका को कार्बन-मुक्ति की सुनिश्चित समय-सारणी नहीं मानना चाहिए। वास्तविक प्रतिस्थापन केवल StarRoad की प्रक्षेपण क्षमता से नहीं, इन बातों से भी सीमित होगा:

- अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा संयंत्रों की उत्पादन दर;

- पावर इलेक्ट्रॉनिक्स, रेडिएटर, ट्रांस, माइक्रोवेव प्रेषक और नियंत्रण प्रणालियों का उत्पादन;
- भूमि पर रेक्टेना का निर्माण;
- विद्युत ग्रिड की क्षमता;
- माइक्रोवेव से शक्ति भेजने की राजनीतिक अनुमति;
- लाभ और जोखिम का अंतरराष्ट्रीय बँटवारा;
- कक्षीय ऊर्जा का बीमा और विनियमन;
- संयंत्रों का रखरखाव, मरम्मत और सेवा-अंत निपटान;
- भूमि-आधारित सौर, पवन, परमाणु, जलविद्युत और भू-तापीय ऊर्जा से प्रतिस्पर्धा।

इसलिए सटीक दावा यह है: StarRoad वैश्विक जीवाश्म विद्युत के पैमाने के तुलनीय प्रतिस्थापन दर को तकनीकी रूप से संभव बनाता है, लेकिन वास्तविक संक्रमण की गति संयंत्र उत्पादन, ग्रिड, रेक्टेना, नीति और बाजार तय करेंगे।

8.3.3. कार्बन-आधारित ऊर्जा का औद्योगिक रूपांतरण

यदि संयंत्र उत्पादन StarRoad के प्रक्षेपणों के साथ कदम मिलाए, तो एक या दो दशकों में टेरावॉट स्तर की कक्षीय शक्ति बनाई जा सकती है। यह भूमि-आधारित ऊर्जा को समाप्त नहीं करेगी, बल्कि उसकी भूमिका बदलेगी: भू-ग्रिड, परमाणु, जलविद्युत, नवीकरणीय, भू-तापीय संयंत्र और भंडारण मिलकर एक संकर प्रणाली बनाएँगे, जिसमें कक्षीय उत्पादन आधारभूत, औद्योगिक और निर्यात परतों को शक्ति देगा।

इस परिदृश्य में कार्बन-आधारित ऊर्जा केवल 'हारती' नहीं है। उसे रूपांतरण का मार्ग मिलता है:

- कोयला और गैस बिजलीघर धीरे-धीरे आधारभूत उत्पादन से बाहर आते हैं;
- गैस अवसंरचना का एक भाग आरक्षित, रासायनिक और कृत्रिम-उत्पाद भूमिकाओं में जाता है;
- तेल और गैस कंपनियाँ अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा, रेक्टेना, हाइड्रोकार्बन रसायन और कार्बन सामग्री में निवेश करती हैं;
- कोयला उद्योग कार्बन कंपोज़िट, अपचायक, रासायनिक कच्चे माल और सामग्री की ओर जा सकता है;
- कुछ स्थापित ऊर्जा कंपनियाँ कक्षीय उत्पादन, रेक्टेना और ग्रिड वितरण की संचालक बनती हैं।

मुख्य राजनीतिक और आर्थिक बात शक्तिशाली उद्योगों से तुरंत स्वयं को नष्ट करने की माँग करना नहीं, बल्कि उन्हें संक्रमण का रास्ता देना है। यदि कार्बन-ऊर्जा क्षेत्र अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा और रासायनिक उत्पादन के जरिए अपना लाभ बनाए या बढ़ाए, तो संक्रमण का विरोध काफी घट सकता है।

8.3.4. यह पारंपरिक 'हरित एजेंडा' से कैसे अलग है

StarRoad ऊर्जा-विस्तार प्रस्तावित करता है, ऊर्जा-संयम नहीं। उसका जलवायु औचित्य सभ्यता की क्षमता घटाना नहीं, उस क्षमता को अधिक टिकाऊ अवसंरचना में ले जाना है।

यह उन तरीकों से अलग है जिन्हें लोग 'जलवायु के लिए बदतर जीवन' की माँग समझते हैं। StarRoad के साथ अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा दूसरी दृष्टि देती है:

- कम नहीं, अधिक ऊर्जा;
- कम उत्सर्जन, कम उद्योग नहीं;
- डिजिटल अर्थव्यवस्था पर सीमा नहीं, अधिक उपलब्ध संगणन शक्ति;
- परिवहन, उत्पादन और दैनिक जीवन का अधिक विद्युतीकरण;
- विकासशील क्षेत्रों के लिए अधिक अवसर;
- ईंधन के रूप में जीवाश्म संसाधनों पर कम निर्भरता, जबकि कार्बन औद्योगिक कच्चे माल के रूप में बना रहे।

यह दृष्टिकोण StarRoad के सभ्यतागत तर्क से बेहतर मेल खाता है: परियोजना मानवता से सिकुड़ने को नहीं कहती; वह ऐसी अवसंरचना बनाती है जो पुराने कार्बन पदचिह्न के बिना विकास संभव करे।

8.3.5. निष्कर्ष: प्राथमिक बाजार के रूप में अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा

गीगावाट वर्ग के अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा संयंत्र StarRoad का गौण उपयोग नहीं है; वे उसकी आर्थिक आवश्यकता के केंद्रीय कारणों में से एक हैं।

दोनों मिलकर:

- अतिभारी प्रक्षेपणों की बड़े पैमाने की माँग बनाते हैं;
- ऊर्जा बिक्री से स्पष्ट व्यावसायिक आय देते हैं;
- भविष्य के कक्षीय औद्योगिक आधार को शक्ति देते हैं;
- रेक्टैना, रिले, टग, अंतरिक्ष-शिपयार्ड और सेवा-बस्तियों की माँग बनाते हैं;
- कार्बन-आधारित ऊर्जा उद्योगों को निवेश का नया क्षेत्र देते हैं;
- ग्रह-स्तरीय जलवायु कार्रवाई का वास्तविक माध्यम देते हैं।

रॉकेट रसद में अंतरिक्ष-आधारित सौर ऊर्जा संयंत्र बहुत भारी, महँगे और संचालन की दृष्टि से जटिल रहते हैं। StarRoad की रसद में वे स्वाभाविक, श्रृंखलाबद्ध माल बन जाते हैं—असाधारण मिशन नहीं, बल्कि बड़े पैमाने के अवसंरचना उद्योग का ऊर्जा उत्पाद।

8.4. कक्षीय स्थान: GEO और EML4/5

अंतरिक्ष सौर विद्युत केंद्रों और संबद्ध अवसंरचना के मुख्य स्थान भूस्थिर कक्षा तथा पृथ्वी-चंद्रमा लाग्रांज बिंदु EML4/5 हैं।

भूस्थिर कक्षा पृथ्वी के निश्चित क्षेत्रों तक बिजली भेजने के अनुकूल है। GEO का उपग्रह या ऊर्जा मंच सतह के सापेक्ष लगभग स्थिर रहता है, जिससे माइक्रोवेव किरण लक्ष्यीकरण, भू-रेक्टैना का स्थान और क्षेत्रीय ग्रिड से जुड़ाव सरल होता है। भूस्थिर कक्षा भूमध्य रेखा से लगभग 35,800 किमी ऊपर है।

EML4 और EML5 बड़ी बस्तियों, शिपयार्ड, औद्योगिक केंद्रों और ऊर्जा समूहों के लिए उपयुक्त हैं। वे पृथ्वी-चंद्रमा प्रणाली के समबाहु त्रिभुजों के शीर्ष पर हैं और एकरेखीय L1/L2 से अधिक दीर्घकालीन स्थिर हैं। बड़े केंद्र, गोदाम, शिपयार्ड, संयोजन ट्रेस और आवासीय परिसर वहाँ निरंतर बड़ी मात्रा में स्थिति-रक्षण प्रणोदक खर्च किए बिना रखे जा सकते हैं।

GEO और EML4/5 का उपयोग LEO से टकराव भी घटाता है। सौर केंद्रों जैसे विशाल मंचों को प्रकाश प्रदूषण, टक्कर जोखिम, विरल वायुमंडलीय घर्षण और खगोल-विज्ञान में बाधा पैदा करने वाले विशाल सरणियाँ LEO में नहीं रखनी पड़तीं। निम्न कक्षा कैप्सूल अवतरण, मध्यवर्ती कार्य, निरीक्षण और विशेष निम्न-कक्षीय कार्यों का सेवा क्षेत्र रहती है।

8.5. आरंभिक चरण: AstroLiner-S की सीधी उड़ानें

आरंभिक चरण में प्रारंभिक, सरल और कम जोखिम वाला शटल AstroLiner-S उपयोग होगा। इसमें विखंडन या संलयन ऊर्जा स्रोत नहीं होगा; अंतिम कक्षा-प्रवेश, सुधार, कक्षा-त्याग और वापसी के लिए रासायनिक प्रणोदन होगा।

मुख्य लक्ष्य पूरी कक्षीय अवसंरचना की परिपक्वता की प्रतीक्षा किए बिना पहला माल प्रवाह बनाना है। इसलिए AstroLiner-S बड़े मॉड्यूल सीधे पहुँचा सकेगा:

- सौर केंद्र और ऊर्जा रिले लगाने के लिए भूस्थिर कक्षा में;
- EML4/5 ऊर्जा समूहों में;
- सौर केंद्र और डेटा केंद्र लगाने के लिए उच्च-ऊर्जा कक्षाओं में।

इस चरण का माल मुख्यतः पूर्ण या लगभग पूर्ण संरचनाएँ हैं:

- स्वतः खुलने वाले अंतरिक्ष सौर विद्युत केंद्र;
- विद्युत-प्रेषण मॉड्यूल;
- बड़े रेडिएटर पैनल;
- डेटा-केंद्र संगणन खंड;
- ट्रेस संरचनाएँ;
- रोबोटिक संयोजक;
- आरंभिक सेवा केंद्र;

- प्रणोदक और कार्य-द्रव भंडार;
- संचार, नौवहन और यातायात-नियंत्रण मॉड्यूल।

LEO पर EML4/5 और GEO के लाभ:

- निम्न-कक्षीय उपग्रहों से प्रकाश प्रदूषण नहीं।
- नियमित दिन-रात चक्र के बिना सौर केंद्रों को लगभग निरंतर प्रकाश।
- पृथ्वी और चंद्रमा के सापेक्ष स्थिर स्थिति।

चरण के मुख्य आँकड़े:

- प्रक्षेपण दर: प्रति माह 1–2, अर्थात प्रति वर्ष 12–24।
- प्रति उड़ान पेलोड: 10,000 टन।
- वार्षिक माल प्रवाह: 120,000–240,000 टन।
- वितरण लागत: \$80–120/kg।
- लक्ष्य कक्षाएँ: EML4/5 और GEO।

यह तरीका आय आने से पहले सारी अंतरिक्ष अवसंरचना बनाने के जाल से बचाता है। पहले वाणिज्यिक पेलोड स्वयं भावी अवसंरचना के घटक हैं।

8.6. परिपक्व चरण: माइक्रोवेव रिले और सेवा अवसंरचना

जब विद्युत केंद्रों, डेटा केंद्रों और बड़े मंचों की संख्या कक्षीय नेटवर्क को निरंतर चलाने लायक हो जाती है, परिपक्व चरण शुरू होता है। कार्य नए केंद्र भेजने से बढ़कर पहले से तैनात केंद्रों की सेवा तक फैलता है।

परिपक्व चरण के मुख्य तत्व:

- GEO में माइक्रोवेव रिले नेटवर्क;
- प्रमुख ऊर्जा समूहों के पास स्थायी सेवा केंद्र;
- मरम्मत और निरीक्षण यान;
- भंडारण केंद्र;
- कक्षीय टग;
- EML4/5 में पहली स्थायी बस्तियाँ और घूर्णी दल;
- स्वचालित और अर्ध-स्वचालित शिपयार्ड;
- EML1 परिवहन केंद्र।

माइक्रोवेव रिले पृथ्वी के क्षेत्रों में ऊर्जा अधिक लचीले ढंग से बाँटते, केंद्र-रेक्टेना की सीधी ज्यामिति पर निर्भरता घटाते और अलग-अलग कक्षीय केंद्रों के बजाय ऊर्जा नेटवर्क बनाते हैं। भूमि पर ग्रहण रेक्टेना, रूपांतरण उपकेंद्र, मध्यवर्ती भंडारण और क्षेत्रीय ग्रिड से जोड़ चाहिए।

स्थायी सेवा सौर केंद्रों की आयु बढ़ाती है। सेवा के बिना अर्थशास्त्र अलग मॉड्यूल की आयु से बँधा है। पैनल, प्रेषक, रेडिएटर, इलेक्ट्रॉनिकी और ट्रस कक्षा में बदले जा सकें तो केंद्र फेंकने योग्य उपग्रह नहीं, रखरखाव योग्य ऊर्जा सुविधा बनते हैं।

8.7. कार्य-परिवेश के अनुसार परिवहन का विभाजन

परिपक्व StarRoad रसद एक सार्वभौमिक यान पर नहीं, परिवेश के अनुसार परिवहन कार्य बाँटने पर आधारित है।

AstroLiner पृथ्वी-कक्षा और कक्षा-पृथ्वी परिवहन करता है। यह कक्षीय भारी-उठान यान, वापसी ग्लाइडर और भारी कंटेनर वाहक है, पर सार्वभौमिक अंतरग्रहीय यान नहीं होना चाहिए।

अंतरकक्षीय यान केवल अंतरिक्ष में चलते हैं। वे वायुमंडल में नहीं जाते, इसलिए अवतरण ताप-कवच, पंख, समुद्री तंत्र या जल-अवतरण का मजबूत ढाँचा नहीं ढोते। कक्षीय केंद्रों के बीच यात्रा के अनुकूलन से उनका शुष्क द्रव्यमान कम और आयु अधिक होती है।

विशेष कैप्सूल ग्रहों पर उतरकर लोगों या माल को सतह तक लाते हैं। उन्हें AstroLiner के मुख्य ढाँचे का भाग बनाना तर्कहीन है: थोड़े लोगों या माल के लिए हजारों टन उतारना व्यर्थ है।

परिवहन पदानुक्रम:

परिवेश	मुख्य यान	कार्य
पृथ्वी → कक्षा	AstroLiner / AstroLiner-S	माल और मॉड्यूल की अतिभारी ढुलाई
उच्च कक्षाएँ और L-बिंदु	अंतरकक्षीय परिवहन और टग	LEO, GEO और EML1/2/4/5 के बीच परिवहन
कक्षा → सतह	यात्री और माल कैप्सूल	लोगों और माल का अवतरण
कक्षीय केंद्र	स्टेशन, गोदाम और शिपयार्ड	भंडारण, संयोजन, मरम्मत और अंतरण

यह विभाजन हर यान-वर्ग का शुष्क द्रव्यमान और समझौते घटाता है तथा अंतरिक्ष रसद को कंटेनर वाहक, टग, बंदरगाह, गोदाम, शिपयार्ड और विशेष जहाजों वाली समुद्री व्यवस्था जैसा बनाता है।

8.8. परिपक्व रसद में AstroLiner की भूमिका

AstroLiner सार्वभौमिक यान नहीं है। इसकी मुख्य भूमिका चक्रीय अतिभारी उठान और पुनःप्रयोज्य वापसी परिवहन है।

ऊपर ले जाई जाने वाली वस्तुएँ:

- माल कंटेनर;
- यात्री मॉड्यूल;
- प्रणोदक मॉड्यूल;
- निर्माण घटक;
- पैनल, ट्रेस, केबल और रेडिएटर;
- जुड़े या अलग भागों में अंतरकक्षीय टग;
- अवतरण कैप्सूल;
- कक्षीय स्टेशन मॉड्यूल;
- विद्युत केंद्र और डेटा केंद्र घटक।

वापसी मुख्यतः खाली या सीमित माल के साथ होती है:

- दल;
- नमूने;
- महँगी मरम्मत योग्य इकाइयाँ;
- सेवानिवृत्त इलेक्ट्रॉनिکی;
- विफल या हटाए गए घटक।

वापसी विन्यास यथासंभव हल्का होना चाहिए। सुरक्षित ग्लाइड, वायुमंडलीय प्रवेश और जल-अवतरण के लिए न्यूनतम अवशिष्ट द्रव्यमान चाहिए, इसलिए वापसी द्रव्यमान प्रक्षेपण द्रव्यमान से बहुत कम हो। हजारों टन पेलोड वापस लाना नियमित कार्य नहीं; विशेष कैप्सूल या अलग वापसी मॉड्यूल यह करते हैं।

AstroLiner चार कारणों से सीमित अपना डेल्टा-वी रखता है:

1. अभी अधूरी अवसंरचना से स्वतंत्रता;
2. वैकल्पिक मार्ग लेने की क्षमता;
3. आपात स्थितियाँ;
4. आरंभिक संचालन में लचीलापन।

परिपक्व प्रणाली में अधिकांश अंतरकक्षीय डेल्टा-वी विशेष टग और परिवहन देते हैं। इससे AstroLiner की माँगें घटती, ढाँचे की आयु बढ़ती और प्रक्षेपण-उतराई-वापसी-सेवा-पुनःप्रक्षेपण चक्र छोटा होता है।

8.9. अंतरकक्षीय परिवहन और टग

अंतरकक्षीय यान StarRoad का स्थायी अंतरिक्ष बेड़ा हैं। वे वायुमंडल या पृथ्वी पर लौटे बिना LEO, GEO, EML1, EML2, EML4/5 और अन्य केंद्रों के बीच चलते हैं।

उनके कार्य:

- AstroLiner उतराई बिंदु से लक्ष्य कक्षा तक मॉड्यूल;
- सौर केंद्र, डेटा केंद्र और बड़े टूस खींचना;
- प्रणोदक और कार्य-द्रव;
- यात्री मॉड्यूल;
- विद्युत-केंद्र घटकों की सेवा और बदलाव;
- अवतरण के लिए कैप्सूल सेवा कक्षा तक पहुँचाना;
- खाली टग EML1 या EML4/5 लौटाना;
- कक्षीय शिपयार्ड सहायता।

ये यान विद्युत, चुंबक-प्लाज़्मागतिक, नाभिकीय-विद्युत, सौर-विद्युत या संकर प्रणोदन ले सकते हैं। वायुमंडलीय प्रवेश न होने से बड़े रेडिएटर, हल्के टूस, बड़े कार्य-द्रव टैंक, बदलने योग्य प्रणोदन इकाइयाँ और कक्षीय शिपयार्ड में मरम्मत जैसे अत्यधिक विशिष्ट गुण संभव हैं।

परिपक्व संरचना में अंतरकक्षीय परिवहन StarRoad को प्रक्षेपण प्रणाली से अंतरिक्ष परिवहन नेटवर्क बनाता है।

8.10. पृथ्वी और अन्य ग्रहों पर अवतरण

विशेष कैप्सूल अवतरण करते हैं, इसलिए AstroLiner को हर कार्य का सार्वभौमिक पुनःप्रवेश यान नहीं बनना पड़ता।

मुख्य प्रकार:

यात्री कैप्सूल (PC) — लोगों के लिए, सुरक्षित प्रवेश, आपातकाल, स्वायत्त अवतरण और यात्री मॉड्यूल से जुड़ाव हेतु बनाया कैप्सूल।

माल कैप्सूल (CCap) — मूल्यवान माल, नमूने, उपकरण, जैविक सामग्री, इलेक्ट्रॉनिकी और सतह पर लौटने वाले घटकों के लिए।

औद्योगिक वापसी कैप्सूल (IRC) — भविष्य में बाज़ार बनने पर बड़ी मात्रा में सामग्री लौटाने वाला मजबूत माल कैप्सूल।

AstroLiner कैप्सूल को कक्षा तक लाता है। अंतरकक्षीय टग, या आरंभ में AstroLiner स्वयं, उन्हें अवतरण सेवा कक्षा तक ले जाते हैं। अलग होने पर हर कैप्सूल स्वतंत्र प्रवेश और अवतरण करता है।

चंद्रमा, मंगल, शुक्र और क्षुद्रग्रहों के लिए उनके परिवेश के अनुरूप अलग अवतरण तंत्र होंगे। वायुमंडल, गुरुत्व, ताप प्रवाह, धूल और उड़ान आवश्यकताएँ इतनी भिन्न हैं कि एक यान सभी सौरमंडलीय पिंडों की सेवा नहीं कर सकता।

8.11. मानकीकृत मॉड्यूल

मानकीकरण StarRoad रसद की नींव है। जैसे समुद्री कंटेनरीकरण ने विश्व व्यापार बदला, मानक कक्षीय मॉड्यूल अंतरिक्ष अर्थव्यवस्था बदलेंगे।

मूल मॉड्यूल प्रकार:

यात्री मॉड्यूल (PM) — AstroLiner, अंतरकक्षीय यान, कक्षीय स्टेशन या यात्री कैप्सूल में उपयोग योग्य दाबित मॉड्यूल; इसमें जीवन-समर्थन, सीट या कक्ष, आपात भंडार, डॉकिंग और मानक जुड़ाव बिंदु हैं।

माल कंटेनर (CC) — पैनल, टूस, रेडिएटर, केबल, उपकरण, रोबोट, पुर्जे और उपभोग्य वस्तुओं का दाबित या अदाबित कंटेनर।

प्रणोदक मॉड्यूल (PrM) — टग और स्टेशन के लिए प्रणोदक, कार्य-द्रव, पानी, ऑक्सीजन, हाइड्रोजन, आर्गन, ज़ेनॉन या अन्य उपभोग्य माध्यम।

उपयोगिता मॉड्यूल (UM) — सौर पैनल, बैटरी, रेडिएटर, एंटीना, परिवर्तक, ऊष्मा-विनिमायक और नियंत्रण इलेक्ट्रॉनिकी वाला ऊर्जा, ताप, संचार या नियंत्रण मॉड्यूल।

निर्माण मॉड्यूल (CM) — टूस, बीम, फ्रेम, रोबोट संयोजक, बंधन तंत्र, टेथर, केबल मार्ग और खुलने वाली संरचनाएँ।

विद्युत-प्रेषण मॉड्यूल (PTM) — माइक्रोवेव एंटीना, फेज़्ड एरे, विद्युत इलेक्ट्रॉनिकी और किरण लक्ष्यीकरण व नियंत्रण।

हर मॉड्यूल में मानकीकरण:

- आयामी वर्ग;
- संरचनात्मक जोड़;
- रोबोट पकड़ बिंदु;
- डॉकिंग जोड़;
- विद्युत और तापीय जोड़;
- डिजिटल पहचान और सेवा अभिलेख;
- अनुमत द्रव्यमान और गुरुत्व-केंद्र सीमा;
- आपात बंधन और अलगाव विधियाँ।

इससे स्टेशन, यान, विद्युत केंद्र और औद्योगिक परिसर अनोखे यानों के बजाय मानक खंडों के संयोजन बनते हैं।

8.12. कक्षीय अवसंरचना का पदानुक्रम

StarRoad की कक्षीय रसद केंद्रों के पदानुक्रम में संगठित है।

पृथ्वी / StarRoad

। निर्माण, संयोजन, प्रक्षेपण, AstroLiner मरम्मत, मॉड्यूल उत्पादन, प्रणोदक तैयारी, ऊर्जा आपूर्ति और माल प्रवाह नियंत्रण।

LEO

। अवतरण कैप्सूल, निरीक्षण, आपातकाल, अस्थायी कार्य और प्रवेश से पहले कैप्सूल अलगाव का सेवा क्षेत्र। परिपक्व प्रणाली में न मुख्य गोदाम, न भीड़भरा औद्योगिक पट्टा।

GEO

। माइक्रोवेव रिले, ऊर्जा मंच, संचार और पृथ्वी के निश्चित क्षेत्रों को बिजली देने का क्षेत्र; कक्षीय ऊर्जा को भू-ग्रिड से जोड़ने योग्य।

EML1

। पृथ्वी-चंद्रमा प्रणाली का मुख्य परिवहन केंद्र। अंतिम स्थान तक सीधी उड़ान न चाहिए तो AstroLiner यहाँ मॉड्यूल उतारता है। यहाँ गोदाम, टग, यातायात नियंत्रण, मरम्मत केंद्र और चंद्र लिफ्ट अंतरण स्टेशन होंगे।

EML1 अत्यधिक स्वचालित हो। बड़ी स्थायी आबादी आवश्यक नहीं: लोग अधिक सुरक्षित चंद्र लावा नलिकाओं, EML4/5 या बड़े स्टेशनों में रहकर आवश्यकता पर EML1 जाएँ।

EML2

। चंद्रमा के दूरस्थ भाग और आसपास रेडियो-शांत वेधशालाओं, गहन-अंतरिक्ष दूरबीनों, परीक्षण केंद्रों, संचार और विज्ञान का क्षेत्र।

EML4 / EML5

। परिपक्व कक्षीय सभ्यता के मुख्य केंद्र: शिपयार्ड, बस्तियाँ, उद्योग, बड़े विद्युत केंद्र, अंतरग्रहीय यान संयोजन, गोदाम, मरम्मत आधार और विस्तार नियंत्रण।

8.13. कक्षीय शिपयार्ड

कक्षीय शिपयार्ड मुख्यतः EML4/5 पर होंगे। उनका उद्देश्य उन संरचनाओं को जोड़ना है जिन्हें StarRoad से भी पूरा भेजा नहीं जा सकता या भेजना उचित नहीं।

AstroLiner सामग्री और संरचनाएँ समतल-पैक माल के रूप में लाता है:

- पैनल;
- ट्रस;
- संरचनात्मक प्रोफाइल;
- केबल;
- रेडिएटर;
- दर्पण;

- झिल्लियाँ;
- टैंक;
- भार-वहन संयोजन;
- रोबोटिक संयोजन प्रणालियाँ।

रोबोट और दूर-संचालक संयोजन करते हैं। मनुष्य सेवा, पर्यवेक्षण, जटिल मरम्मत और असाधारण निर्णय लेते हैं, पर अधिकांश जोखिमपूर्ण संयोजन हाथ से नहीं करना चाहिए।

शिपयार्ड बनाते हैं:

- नए अंतरिक्ष सौर केंद्र;
- बड़े रेडिएटर क्षेत्र;
- अंतरकक्षीय परिवहन;
- अंतरग्रहीय यान;
- आवासीय स्टेशन;
- क्षुद्रग्रह-प्रसंस्करण परिसर;
- भावी महा-संरचनाओं के घटक।

इस चरण में StarRoad केवल पृथ्वी से प्रक्षेपण प्रणाली नहीं रहता। यह उत्पादन शृंखला की निचली कड़ी बनता है जिसमें पृथ्वी जटिल घटक देती है और अंतरिक्ष धीरे-धीरे संयोजन, सेवा व निर्माण का भाग संभालता है।

8.14. कक्षीय और चंद्र बस्तियाँ

स्थायी बस्तियाँ अपने आप में लक्ष्य नहीं, बड़ी अवसंरचना की सेवा की आवश्यकता से बनती हैं। केंद्र, शिपयार्ड, टग, रिले, चंद्र उत्पादन केंद्र और औद्योगिक मंच बढ़ने पर पूर्ण दूरस्थ सेवा पर्याप्त नहीं रहती।

बड़ी कक्षीय बस्ती का मुख्य रूप स्टैनफोर्ड टोरस या उसके व्युत्पन्न जैसा कृत्रिम गुरुत्व वाला घूर्णी स्टेशन है। इन्हें EML4/5 जैसे स्थिर स्थानों पर रखकर कक्षीय उद्योग के आवास, सेवा, चिकित्सा, मरम्मत और प्रशासन केंद्र बनाया जाता है।

चंद्र आधारों के स्थायी कर्मी चंद्रमा पर नहीं, EML4/5 के कृत्रिम-गुरुत्व स्टेशनों पर रहें। इससे कम चंद्र गुरुत्व के दीर्घ स्वास्थ्य प्रभाव घटते और लोग चंद्र अवसंरचना के पास रहते हैं। चंद्र सतह घूर्णी पालियों वाला औद्योगिक कार्यस्थल बनती है।

EML1 चंद्र प्रणाली का केंद्रीय अंतरण और रसद केंद्र बनता है। पृथ्वी, चंद्रमा, EML4/5 और अन्य कक्षाओं के प्रवाह के लिए गोदाम, डॉक, टग, ईंधन मॉड्यूल, मरम्मत और नियंत्रण केंद्रित होते हैं। चंद्रमा के पास कर्मी रखने से पृथ्वी से बार-बार भेजने की तुलना में पाली, आपात प्रतिक्रिया, मरम्मत और उत्पादन नियंत्रण सरल होते हैं।

चंद्र सतह को EML1 क्षेत्र से जोड़ने वाली चंद्र लिफ्ट मुख्य घटक है। रेजोलिथ, ऑक्सीजन, धातु, निर्माण सामग्री और औद्योगिक मॉड्यूल ऊपर; उपकरण, उपभोग्य वस्तुएँ और घूर्णी दल नीचे जाते हैं। इससे सतह से निरंतर रॉकेट प्रक्षेपण बिना चंद्र उद्योग शिपयार्ड, बस्तियों और अंतरकक्षीय रसद से स्थायी जुड़ता है।

कम चंद्र गुरुत्व के कारण बस्तियाँ मुख्यतः घूर्णी पालियों से चलने वाले सुरक्षित औद्योगिक आधार होंगी। वे खनन, प्रसंस्करण, ऊर्जा, निर्माण, स्वचालित उपकरण, ऑक्सीजन उत्पादन, रेजोलिथ प्रसंस्करण, लिफ्ट घटक संयोजन और EML1 माल तैयारी संभालेंगी।

कक्षीय और चंद्र बस्तियों का विकिरण संरक्षण कई परतों में है:

- पानी, पॉलीएथिलीन, चंद्र रेजोलिथ, ईंधन या भंडार का निष्क्रिय कवच;
- सर्वाधिक सुरक्षित क्षेत्र केंद्र और भीतर;
- आवेशित कण प्रवाह घटाने वाला सक्रिय चुंबकीय संरक्षण;
- सौर प्रोटॉन घटनाओं के आपात आश्रय।

पानी, हाइड्रोजन, पॉलीएथिलीन, ईंधन और रेजोलिथ उपयोगी भंडार और विकिरण द्रव्यमान दोनों हैं। संचालन चक्र में जुड़कर संरक्षण मृत भार नहीं रहता।

8.15. रसद उपमा: समुद्री नेटवर्क जैसा अंतरिक्ष

परिपक्व StarRoad प्रक्षेपण कार्यक्रम से अधिक समुद्री रसद जैसा है।

इस उपमा में:

- **AstroLiner** पृथ्वी और कक्षा के बीच अतिभारी कंटेनर वाहक है;
- **अंतरकक्षीय टग** बंदरगाह ट्रैक्टर और समुद्री टग हैं;
- **अंतरकक्षीय परिवहन** लंबी दूरी के जहाज़ हैं;
- **EML1** अंतरण बंदरगाह और वितरण केंद्र है;
- **GEO** ऊर्जा और संचार लंगरगाह है;
- **EML4/5** औद्योगिक बंदरगाह, शिपयार्ड और नगर हैं।
- **कैप्सूल** विशेष अवतरण यान हैं;
- **PM, CC, PrM, UM, CM और PTM** मॉड्यूल कंटेनर और कार्यात्मक खंड हैं।

यह दृष्टिकोण अंतरिक्ष उड़ान की संस्कृति बदलता है। अनोखे अभियानों का स्थान समय-सारिणी, कंटेनर परिसंचरण, मरम्मत, बीमा, मानक, गोदाम, बंदरगाह यातायात और औद्योगिक माल कारोबार लेते हैं।

8.16. माल प्रवाह का अर्थशास्त्र

StarRoad अंतरिक्ष अर्थव्यवस्था का नियम पलटता है। रॉकेट रसद में हर किलोग्राम महंगा होने से द्रव्यमान बचाना सस्ता है; StarRoad में मानकीकरण, बड़े पैमाने का उत्पादन और बड़ी खेपें सस्ती हैं।

इससे अभियांत्रिकी विकल्प बदलते हैं:

- संरचनाएँ मजबूत और आसानी से मरम्मत योग्य हो सकती हैं;
- उपकरण में अधिक सुरक्षा-अंतर रखा जा सकता है;
- स्टेशन फेंकने योग्य उपग्रह नहीं, सेवा योग्य सुविधा बन सकते हैं;
- रेडिएटर, परिरक्षण और फ्रेम का द्रव्यमान निरपेक्ष बाधा नहीं रहता;
- कई अल्पायु छोटे यानों से बड़े मंच अधिक आर्थिक बनते हैं।

मुख्य आर्थिक प्रभाव है कि StarRoad केवल प्रक्षेपण बाज़ार नहीं, कक्षीय सुविधाओं का बाज़ार बनाता है। आय माल ढुलाई के साथ विद्युत केंद्र, डेटा केंद्र, रिले, टग, शिपयार्ड और ऊर्जा नेटवर्क के निर्माण, स्वामित्व और संचालन से आती है।

संभावित वाणिज्यिक मॉडल:

- बाहरी ग्राहकों को प्रक्षेपण बेचना;
- ऊर्जा अवसंरचना के दीर्घ अनुबंध;
- अंतरिक्ष सौर केंद्रों का स्वामित्व और संचालन;
- ऊर्जा कंपनियों से संयुक्त उद्यम;
- कक्षीय डेटा-केंद्र क्षमता पट्टे पर देना;
- भू-रेक्टेना से बिजली बेचना;
- कक्षीय सुविधा सेवा अनुबंध;
- अंतरकक्षीय परिवहन शुल्क;
- स्टेशन बीमा, मरम्मत और आयु-विस्तार।

यह किसी एक बाज़ार पर निर्भरता घटाता है। बाहरी माँग कम हो तो StarRoad ऊर्जा और कक्षीय-उद्योग कार्यक्रमों से अपना माल प्रवाह बनाता है।

8.17. बाज़ार और रसद विकास के चरण

माँग और कक्षीय रसद चार चरणों में विकसित होती है।

I. आधार चरण (10–20 वर्ष) — ऊर्जा माल प्रवाह। AstroLiner-S

पूर्ण या लगभग पूर्ण अंतरिक्ष सौर विद्युत संयंत्र, डेटा केंद्र, रिले, सेवा मॉड्यूल और शुरुआती टग प्रक्षेपित करता है। मुख्य उद्देश्य नियमित प्रक्षेपण सिद्ध करना, पहले वाणिज्यिक ऊर्जा प्रतिष्ठान बनाना और कक्षीय विद्युत उत्पादन का बाजार तैयार करना है।

II. परिपक्व चरण (20–50 वर्ष) — कक्षीय सेवा नेटवर्क।

GEO रिले, EML1 केंद्र, सेवा स्टेशन, मरम्मत यान, टग तथा EML4/5 पर पहली स्थायी बस्तियाँ और पोत-निर्माण केंद्र बनते हैं। AstroLiner धीरे-धीरे हर गंतव्य तक सीधी उड़ानों से नेटवर्क केंद्रों पर माल उतारने वाली भारी परिवहन प्रणाली की भूमिका में आता है।

III. औद्योगिक चरण (50–100 वर्ष) — पृथ्वी से बाहर उत्पादन।

अंतरग्रहीय अंतरिक्षयान, क्षुद्रग्रह प्रसंस्करण परिसर और बड़े कक्षीय आवासों का सक्रिय निर्माण शुरू होता है। प्रणाली पृथ्वी-बाह्य सामग्री का अधिक उपयोग करती है, जिससे पृथ्वी से भारी मात्रा में कच्चा माल भेजने पर निर्भरता घटती है।

IV. विकासात्मक और संभावित चरण (100+ वर्ष) — सौरमंडलीय अवसंरचना।

EML4/5 सौरमंडल में विस्तार, महा-संरचनाओं, सौर झुंडों, ओ'नील सिलिंडरों, सुदूर-अंतरिक्ष दूरबीनों और अंतरतारकीय अभियानों के प्रस्थान बिंदु बनते हैं।

यह क्रम महत्वपूर्ण है: StarRoad को शुरुआत में पूर्ण विकसित अंतरिक्ष सभ्यता की जरूरत नहीं। वह स्पष्ट माँग स्रोतों—ऊर्जा और संगणना—से शुरू होता है और उसके बाद ही पूर्ण अंतरिक्ष अर्थव्यवस्था में विस्तार करता है।

8.18. विकास की संभावना: StarRoad का उत्तराधिकारी

StarRoad को ग्रहीय परिवहन का अंतिम रूप नहीं होना चाहिए। यह रॉकेट युग और परिपक्व अंतरिक्ष-अभियांत्रिकी महा-संरचनाओं के बीच संक्रमण का आवश्यक चरण है।

अंतरिक्ष लिफ्ट, लॉन्च लूप, StarTram, कक्षीय वलय और अंतरिक्ष मीनार में केवल उन्नत कक्षीय वलय अंततः StarRoad की क्षमता पार कर सकता है। किंतु उसके लिए शक्तिशाली कक्षीय उद्योग, विशाल सामग्री, शिपयार्ड, ऊर्जा, रोबोटिक संयोजन और महा-संरचना संचालन अनुभव चाहिए।

संभावित उत्तराधिकारी दो जुड़े वलयों की प्रणाली है:

- पृथ्वी को घेरे और निम्नतम बिंदु पर सतह से मिले परिवहन वलय;
- GEO ऊँचाई का भूस्थिर बंदरगाह वलय और अंतरिक्ष डॉक;
- परिवहन वलय की सीलबंद शाफ्टों में कई गतिमान केबल रोटर;
- पथ के उच्चतम बिंदु पर परिवहन और भूस्थिर बंदरगाह वलय का जोड़।

लॉन्च लूप की तरह इसमें सीलबंद नालियों में तेज रोटर हैं, पर यह अधिक सुरक्षित हो सकता है। केबल रोटर तीखे मोड़ नहीं लेते और उन पर कम त्रिज्य भार पड़ता है; आपात टूटन में उन्हें पूरी संरचना नष्ट किए बिना ग्रह से दूर जाने हेतु बनाया जा सकता है। यह सतह से भूस्थिर बंदरगाह वलय तक गतिशील वलयाकार अंतरिक्ष मीनार होगा।

यह पहले StarRoad का विकल्प नहीं, संभावित उत्तराधिकारी है। StarRoad या समान मुख्य मार्ग बिना कक्षीय वलय हेतु सामग्री, उपकरण, शिपयार्ड और ऊर्जा क्षमता सस्ती नहीं पहुँच सकती।

8.19. ग्रहीय अभियांत्रिकी की क्षमता: एक संसाधन प्रणाली के रूप में सौरमंडल

StarRoad भविष्य में विशाल अंतरिक्ष-अभियांत्रिकी और भू-अनुरूपण जैसी आज अकल्पनीय संभावनाएँ खोल सकता है। ये तभी संभव हैं जब सस्ता पृथ्वी-उत्थान, अंतरिक्ष सौर ऊर्जा, EML4/5 शिपयार्ड, क्षुद्रग्रह खनन, अंतरग्रहीय परिवहन, टैंकर बेड़ा और गहन-अंतरिक्ष ऊर्जा वाली परिपक्व सौरमंडलीय अवसंरचना हो।

मुख्य विचार शुक्र और मंगल को अलग कार्यक्रम नहीं, एक संसाधन प्रणाली मानना है। मंगल में नाइट्रोजन, हाइड्रोजन, घना वायुमंडल और चुंबकीय संरक्षण कम हैं। शुक्र में विशाल CO₂ व नाइट्रोजन और पृथ्वी-समान द्रव्यमान-गुरुत्व हैं, पर लगभग 460°C, 92 वायुमंडल, CO₂, सल्फ्यूरिक अम्ल बादल, चुंबकीय क्षेत्र का अभाव और धीमे विपरीत घूर्णन के चरम परिवेश में बंद हैं।

8.19.1. प्रारंभिक चरण: सौरमंडलीय अवसंरचना

ग्रहीय भू-अनुरूपण से पहले चाहिए:

- पृथ्वी से कम लागत द्रव्यमान उठाने वाला StarRoad;
- ऊर्जा स्रोत के रूप में अंतरिक्ष सौर केंद्र और सौर समूह;
- EML4/5 कक्षीय शिपयार्ड;
- धातु, पानी और वाष्पशील पदार्थों का उन्नत क्षुद्रग्रह खनन;
- दर्जनों या सैकड़ों उन्नत आत्मनिर्भर अंतरिक्ष बस्तियाँ और ऊर्जा केंद्र;
- हाइड्रोजन, पानी, नाइट्रोजन और CO₂ टैंकर बेड़ा;
- लंबी दूरी के नाभिकीय-विद्युत या संलयन परिवहन।

ऐसे कार्यक्रम StarRoad संचालन शुरू होने के कम-से-कम 100+ वर्ष बाद ही उचित हैं; घातीय वृद्धि उन्हें तेज कर सकती है।

8.19.2. शुक्र: भू-अनुरूपण के चरण

बड़े दीर्घकालीन निवास के लिए शुक्र मंगल से बेहतर हो सकता है: लगभग 0.9g, पृथ्वी-समान द्रव्यमान और प्रचुर सौर ऊर्जा। मुख्य समस्या अत्यंत ऊँची शुरुआती बाधा है।

1. शीतलन और CO₂

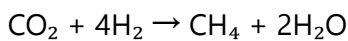
निक्षेपण। शुक्र-सूर्य L1 पर विशाल छाया आगत ऊर्जा घटाती है। गहरे शीतलन में CO₂ का बड़ा भाग द्रव या ठोस होकर सतह पर बैठता और दबाव तेजी से गिरता है, जिससे नारकीय वातावरण अभियांत्रिकी योग्य बनता है।

2. अर्ध-समकालिक वलय और कक्षीय

बंदरगाह। शीतलन के बाद भावी 24-घंटे समकालिक कक्षा की सतह से लगभग 33,400 किमी ऊँचाई पर गतिशील वलय बनता है। परिधि लगभग 248,000 किमी, स्थानीय गुरुत्व 0.021g और मुक्त वृत्तीय वेग 2.87 किमी/से है। धीमे घूर्णन के दौरान सक्रिय रोटार इसे संभालते हैं; यह बंदरगाह, ऊर्जा केंद्र और टैंकर स्थल है।

3. वायुमंडलीय प्रसंस्करण और

हाइड्रोजन आयात। निक्षिप्त CO₂ केंद्रों तक उठता है। हाइड्रोजन बाहरी सौरमंडल, हिम-पिंड और क्षुद्रग्रहों से आता है। मूल CO₂-बन्धन अभिक्रिया:



पानी महासागर और ऑक्सीजन; मीथेन ईंधन व रासायनिक कच्चा माल; कार्बन सामग्री और दीर्घ भंडार; सल्फर यौगिक खनिज बनते हैं। अतिरिक्त नाइट्रोजन और CO₂ मंगल भेजे जा सकते हैं।

4. निवास योग्य

शुक्र। महासागर, नाइट्रोजन-ऑक्सीजन वायुमंडल, नियंत्रित जलवायु, चुंबकीय संरक्षण और शुरुआती जैवमंडल के बाद मुख्य रूपांतरण पूर्ण माना जा सकता है। लगभग 120 घंटे के मध्यवर्ती घूर्णन में भी निवास संभव है; लगभग 60 घंटे की रात महासागर, बादल, 1.3–1.6 bar वायुमंडल, ताप परिवहन, दर्पण और छायाएँ संभालते हैं।

5. कक्षीय घूर्णन-सुधार और 24 घंटे

का दिन। 24 घंटे निवास की शर्त नहीं, दीर्घ अभियांत्रिकी सुधार है। वर्तमान विपरीत घूर्णन से सीधे 24 घंटे हेतु लगभग 4.3×10^{33} kg·m²/s कोणीय संवेग चाहिए। लगभग 100 km/s निकास पर 1.1×10^{21} kg कार्य-द्रव और आदर्श 5×10^{30} J चाहिए; 300 EW पर 500–600 वर्ष। हानि और 10^{31} – 3×10^{31} J मानने पर 300 EW में 1,000–3,000 वर्ष, 100–200 EW में कई हजार वर्ष। ग्रह और अर्ध-समकालिक वलय के विपरीत बिंदुओं से जुड़े दो परिवहन वलय संवेग सतह तक देते और अतिरिक्त स्थिरता देते हैं। 24 घंटे पर वलय पूर्ण शुक्र-समकालिक डॉक बनता है।

8.19.3. मंगल: भू-अनुरूपण के चरण

मंगल पर शुरुआती आधार सरल, पूर्ण ग्रहीय पर्यावरण कठिन है। लगभग 0.38g, विरल वायुमंडल, कम नाइट्रोजन व वाष्पशील पदार्थ और कमजोर चुंबकीय संरक्षण के कारण शुक्र, क्षुद्रग्रह और बाहरी सौरमंडल से पदार्थ चाहिए।

1. कृत्रिम

चुंबकमंडल। दीर्घकालीन रूपांतरण की पहली शर्त चुंबकीय संरक्षण है: पृथ्वी-सदृश समकालिक व परिवहन वलय, ऊर्जा-दर्पण मंच और समकालिक वलय में चुंबकीय तंत्र। बिना इसके नया वायुमंडल सौर पवन से खोता रहेगा। मंगल वलय परिवहन, कक्षा, ऊर्जा और चुंबकमंडलीय कार्य जोड़ता है; सौर पैनल और भंडारण कृत्रिम क्षेत्र के परिपथ, विद्युत इलेक्ट्रॉनिकी व नियंत्रण को ऊर्जा देते हैं।

2. वायुमंडल

और पानी आयात। नाइट्रोजन व कुछ CO₂ शुक्र से; पानी क्षुद्रग्रह, हिम-पिंड और बाहरी सौरमंडल से आता है। साझा संसाधन नेटवर्क मंगल की कमी पूरी कर पृथक स्थानीय निर्माण से जल्दी स्थिर जलवायु देता है।

3. वायुमंडल घना करना और ताप

बढ़ाना। चुंबकीय सुरक्षा के बाद CO₂, नाइट्रोजन, जलवाष्प और अतिरिक्त ग्रीनहाउस पदार्थ वायुमंडल बनाते हैं। घना वायुमंडल ताप, ऊष्मा परिवहन और दबाव बढ़ाकर तरल जल क्षेत्र फैलाता है।

4. पानी, मिट्टी

और जैवमंडल। जलाशय, रेजोलिथ प्रसंस्करण, मिट्टी विषाक्तता में कमी और सूक्ष्मजीव-पादप तंत्र क्रमशः स्थानीय संरक्षित जैवमंडल, क्षेत्रीय जलवायु और वैश्विक स्थिरता तक बढ़ते हैं।

5. ग्रह-स्तरीय

उपयोगी पर्यावरण। पर्याप्त आयात से मंगल घना नियंत्रित वायुमंडल, कृत्रिम चुंबकीय सुरक्षा, जल, जैविक क्षेत्र और विशाल उद्योग पा सकता है। 0.38g पृथ्वी-सदृश दीर्घ निवास में शुक्र से कम अनुकूल होगा, पर सस्ता आरोह-अवतरण, आसान कक्षीय रसद, विशाल संरचना, कम-गुरुत्व निर्माण और आंतरिक सौरमंडल-क्षुद्रग्रह पट्टी औद्योगिक-विज्ञान केंद्र लाभ हैं।

8.19.4. संयुक्त परिदृश्य का लाभ

शुक्र-मंगल-बाहरी सौरमंडल संयुक्त योजना अलग योजनाओं से मजबूत है। मंगल अकेला नाइट्रोजन, पानी, ऊर्जा और चुंबकीय सुरक्षा से सीमित; शुक्र अकेला अतिरिक्त CO₂ के उपयोगकर्ता बिना विशाल वायुमंडल सँभालता। साझा मॉडल में शुक्र का नाइट्रोजन-CO₂ मंगल को, बाहरी हाइड्रोजन-पानी शुक्र को, क्षुद्रग्रह उद्योग धातु और निर्माण सामग्री देता है।

StarRoad प्रत्यक्ष भू-अनुरूपण साधन नहीं, कारण-श्रृंखला की पहली कड़ी है: सस्ता उठान, सौर ऊर्जा, EML4/5 शिपयार्ड, क्षुद्रग्रह कच्चा माल, ग्रहीय पदार्थ-विनिमय टैंकर; फिर ग्रहीय अभियांत्रिकी संभव होती है।

8.20. रणनीतिक निष्कर्ष

StarRoad और AstroLiner प्रक्षेपण कार्यक्रम नहीं, स्थायी अंतरिक्ष अर्थव्यवस्था बनाते हैं।

आरंभिक बाज़ार सौर ऊर्जा, कक्षीय डेटा केंद्र और ऊर्जा अवसंरचना; परिपक्व बाज़ार सेवा, मरम्मत, ऊर्जा रिले, अंतरकक्षीय रसद, शिपयार्ड और बस्तियाँ; औद्योगिक चरण क्षुद्रग्रह-अंतरग्रहीय अर्थव्यवस्था; विकास चरण महा-संरचनाएँ, दूर अभियान और सभ्यता विस्तार।

केंद्रीय विचार है कि StarRoad पुरानी अंतरिक्ष उड़ान में बाज़ार नहीं खोजता; वह नया बाज़ार बनाता है जहाँ बड़े माल प्रवाह, कक्षीय ऊर्जा, संगणन और अंतरिक्ष उद्योग एक रसद प्रणाली हैं।

9. परियोजना का आर्थिक मॉडल

9.1. पद्धति और प्रमुख मान्यताएँ

आर्थिक मॉडल इन सिद्धांतों पर आधारित है:

- **श्रृंखलाबद्ध और आंतरिक उत्पादन:** बड़े पैमाने पर उत्पादन से सुरंग खोदने वाली मशीनों, जनरेटरों और भंडारण प्रणालियों की लागत 30–50% घटती है।
- **स्थानीयकरण:** अफ्रीकी संसाधनों, श्रम और सामग्रियों का उपयोग, Spon's African Construction Cost Handbook के आधार पर समायोजित।
- **वर्तमान बाजार मूल्य:** BESS और भू-तापीय संयंत्रों के लिए 2025–2026 के आँकड़े।
- **संकेतक विनिमय दर:** 1 USD ≈ 100 RUB / 0.90 EUR। सभी गणनाएँ मुद्रास्फीति रहित 2025 के स्थिर डॉलर में हैं। ±30% अनिश्चितता पूर्व-व्यवहार्यता अध्ययन के सामान्य मानक के अनुरूप है।

9.2. अफ्रीकी परिस्थितियों में खुदाई की लागत

Spon's African Construction Cost Handbook अफ्रीका के 13 देशों में श्रम और सामग्री की लागत का विस्तृत विवरण देता है। परिस्थितियों में अत्यधिक भिन्नता के कारण यह बहुत बड़े अनुप्रस्थ काट वाली सुरंगों की सीधी इकाई लागत नहीं देता, पर अनुमानों को समायोजित करने का आधार प्रदान करता है।

कार्य का प्रकार	परिमाण	प्रति किमी औसत लागत	कुल लागत (अरब USD)	आधार
मुख्य सुरंग (17.5 × 12.5 मी)	2,050 किमी	12–18 मिलियन अमेरिकी डॉलर	\$24.6–36.9	बड़े अनुप्रस्थ काट के वैश्विक आँकड़ों को अफ्रीकी परिस्थितियों के अनुसार समायोजित कर निकाला गया अनुमान।
संग्राहक सुरंगें (6 × 2,050 किमी, Ø2 मी)	12,300 किमी	3–5 मिलियन अमेरिकी डॉलर	\$36.9–61.5	अफ्रीका के वास्तविक खनन कार्यों पर आधारित: छोटे काट के लिए 3,500 अमेरिकी डॉलर/मी।
सेवा सुरंग (Ø3 मी)	2,050 किमी	4–6 मिलियन अमेरिकी डॉलर	\$8.2–12.3	संग्राहक सुरंगों जैसा, बड़े काट के लिए समायोजित।
ढलानदार सुरंगें (40 × 16 किमी, 17.5 × 12.5 मी)	640 किमी	12–22 मिलियन अमेरिकी डॉलर	\$7.7–14.1	मुख्य सुरंग जैसा, 30° ढलान के लिए अतिरिक्त लागत सहित।
कुल खुदाई लंबाई	17,040 किमी		\$77.4–124.8	

9.3. आंतरिक उत्पादन वाली सुरंग-खोदक मशीनों का बेड़ा

40 मुख्य, 240 संग्राहक और 40 सेवा मशीनों का श्रृंखलाबद्ध आदेश तथा गैबॉन और कांगो लोकतांत्रिक गणराज्य में असेंबली लाइनें लागत 30–50% घटाती हैं।

शील्ड का प्रकार	व्यास	संख्या	श्रृंखला और आंतरिक उत्पादन में इकाई मूल्य	कुल (अरब USD)
मुख्य सुरंग-खोदक मशीन (SR-Main)	लगभग 18 मी	40 इकाइयाँ	35–60 मिलियन अमेरिकी डॉलर	\$1.4–2.4
संग्राहक सुरंग-खोदक मशीन (SR-Collector)	2 मी	240 इकाइयाँ	0.8–1.5 मिलियन अमेरिकी डॉलर	\$0.19–0.36
सेवा सुरंग-खोदक मशीन (SR-Service)	3 मी	40 इकाइयाँ	1.2–2 मिलियन अमेरिकी डॉलर	\$0.05–0.08
असेंबली संयंत्र (2)	—	—	1–2 अरब अमेरिकी डॉलर	\$1–2
सुरंग-खोदक मशीनें कुल				\$2.64–4.84

9.4. स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली

केन्या का वास्तविक 35 MW मेनेंगाई भू-तापीय संयंत्र, ड्रिलिंग और भाप-कुओं सहित, लगभग 35–40 मिलियन अमेरिकी डॉलर यानी 1,000–1,250 अमेरिकी डॉलर/kW में बना। 40 संयंत्रों के श्रृंखलाबद्ध निर्माण और स्थानीय उत्पादन से इकाई लागत 800–1,200 अमेरिकी डॉलर/kW मानी जा सकती है।

- एक 2.5 GW स्टेशन की लागत: \$2.0–3.0 अरब।
- 40 स्टेशनों की लागत: \$80–120 अरब।

यह अनुमान रूसी भू-तापीय विद्युत संयंत्रों की निचली लागत—इतुरूप के आँकड़ों के अनुसार लगभग \$650/kW—और जटिल परियोजनाओं की ऊपरी सीमा \$1,500/kW से पुष्ट होता है। गणना 100 GW की कुल भू-तापीय प्रणाली शक्ति की ऊपरी धारणा पर आधारित है। वास्तविक उपलब्ध शक्ति भूवैज्ञानिक सर्वेक्षण के बाद ही आंकी जा सकती है और काफी कम, यहाँ तक कि कुछ गीगावॉट, हो सकती है। तब बचा धन वैकल्पिक विद्युत-उत्पादन स्रोतों के निर्माण में लगाया जाएगा।

9.5. ऊर्जा भंडारण प्रणाली

भंडारण के तीन स्तर हैं:

9.5.1. प्राथमिक स्तर: टर्मिनलों पर दीर्घकालीन भंडारण

40 टर्मिनलों पर स्थापित यह प्रणाली एक प्रक्षेपण के लिए आवश्यक 360 GWh ऊर्जा को अतिरिक्त मार्जिन सहित संचित करती है। वर्तमान कीमतों पर पसंदीदा तकनीकें हैं:

भंडारण तकनीक	इकाई लागत	स्रोत
गुरुत्वीय ऊर्जा भंडारण	50–100 अमेरिकी डॉलर/kWh	Energy Vault का अनुभव: 25 MW/100 MWh के लिए 7.7 मिलियन अमेरिकी डॉलर, अर्थात 77 अमेरिकी डॉलर/kWh। दक्षता 75–85% और आयु 30–40 वर्ष।
जल-तापीय मुख्य नहर पर पम्पड-स्टोरेज और लघु जलविद्युत	80–150 अमेरिकी डॉलर/kWh	मार्ग के प्राकृतिक ऊँचाई-अंतर का उपयोग।
लिथियम-आयन BESS	पूर्ण स्थापना सहित 125 अमेरिकी डॉलर/kWh	Ember (2025) के अनुसार: चीनी उपकरण 75 अमेरिकी डॉलर/kWh और स्थापना 50 अमेरिकी डॉलर/kWh। 215 GWh के पैमाने पर लागत 100 अमेरिकी डॉलर/kWh तक गिर सकती है।

कुल प्राथमिक क्षमता 360 GWh है, यानी एक पूरा त्वरण चक्र। 70% गुरुत्वीय/पम्ड-स्टोरेज और 30% BESS वाली प्रणाली की लागत:

घटक	क्षमता	इकाई लागत	लागत
गुरुत्वीय + पम्ड-स्टोरेज	250 GWh	60 अमेरिकी डॉलर/kWh	15 अरब अमेरिकी डॉलर
BESS	110 GWh	125 अमेरिकी डॉलर/kWh	13.75 अरब अमेरिकी डॉलर
प्राथमिक स्तर कुल	360 GWh		28.75 अरब अमेरिकी डॉलर

अनिश्चितता सहित सीमा: 22–35 अरब अमेरिकी डॉलर।

9.5.2. द्वितीयक स्तर: कॉइलों के पास और सुरंग में बफर

कॉइलों के पास लगे फ्लाईव्हील क्षणिक बदलावों को समतल करते हैं। इकाई लागत 0.5–1 मिलियन अमेरिकी डॉलर/MWh; 1–5 GWh बफर क्षमता की लागत 0.5–5 अरब डॉलर है।

9.5.3. आवेग स्तर: माइक्रोसेकंड स्थिरीकरण

सुपरकैपेसिटर केवल कुछ माइक्रोसेकंड के आवेगों की भरपाई करते और अचानक भार बदलने पर वोल्टेज स्थिर रखते हैं। कुल क्षमता प्रक्षेपण ऊर्जा के 1% से कम, यानी 1–3 GWh है। 300–500 अमेरिकी डॉलर/kWh पर लागत 0.3–1.5 अरब डॉलर है।

9.5.4. भंडारण की कुल लागत

स्तर	तकनीक	क्षमता	लागत (अरब USD)
प्राथमिक	गुरुत्वीय + पम्ड-स्टोरेज + BESS	360 GWh	\$22–35
बफर	फ्लाईव्हील	1–5 GWh	\$0.5–5
आवेग	सुपरकैपेसिटर	1–3 GWh	\$0.3–1.5
भंडारण कुल			\$22.8–41.5

9.6. औद्योगिक केंद्र और लॉजिस्टिक्स

लागत मद	लागत (अरब USD)	आधार
गैबॉन औद्योगिक केंद्र: शटल और प्रक्षेपण मॉड्यूल निर्माण	\$3–6	जहाज-निर्माण गोदियाँ, कारखाने और क्रेन
कांगो लोकतांत्रिक गणराज्य औद्योगिक केंद्र: उच्च-ऊँचाई वायुमंडलीय पोर्टल और उच्च-गति मॉड्यूल	\$2–4	पर्वतीय औद्योगिक केंद्र और इलेक्ट्रोलिसिस प्रणाली
गैबॉन और टैंगानिका झील पर बंदरगाह विकास	\$1–3	घाट, क्रेन और गोदाम
2,050 किमी मार्ग के साथ विद्युत लाइनें और सड़कें	\$4–8	220 kV लाइनें, सड़कें और पुल
जल-तापीय मुख्य नहर	\$2–5	मिट्टी का काम, अस्तर और जल-कपाट
कुल	\$12–26	

9.7. अनुसंधान एवं विकास और प्रोटोटाइप — चरण 0

लागत मद	सीमा (अरब USD)	आधार
गणितीय मॉडलिंग और CFD	\$0.01–0.03	संदर्भ: हाइपरलूप के डिजिटल ट्विन का विकास, 4.5 मिलियन CHF।
2,050 किमी मार्ग का भूवैज्ञानिक सर्वेक्षण	\$0.015–0.025	दुर्गम क्षेत्रों के विस्तृत सर्वेक्षण के लिए 7,000–12,000 अमेरिकी डॉलर/किमी।
BIM डिजाइन और दस्तावेजीकरण	\$0.02–0.05	तकनीकी आवश्यकताएँ, प्रारंभिक और विस्तृत डिजाइन।
पोर्टल और अतिचालकों का परीक्षण केंद्र	\$0.01–0.03	प्रोटोटाइप पोर्टल कक्ष और चुंबकीय उत्तोलन मॉड्यूल की परीक्षण पीठ।
कंसोर्टियम गठन और कानूनी समझौते	\$0.005–0.015	अंतरराष्ट्रीय वार्ता, पंजीकरण और बीमा।
चरण 0 कुल	\$0.06–0.15	

0.06–0.15 अरब अमेरिकी डॉलर का अनुसंधान बजट स्थिर नहीं है। गहन अध्ययन, पूर्ण आकार का पोर्टल प्रोटोटाइप या बड़े परीक्षण केंद्र इसे 0.5–3 अरब तक बढ़ा सकते हैं। इसलिए CAPEX सारांश 0.1–3 अरब की सीमा और 1.5 अरब डॉलर का मध्य मान अपनाता है।

9.8. अंतिम CAPEX सारांश

लागत मद	सीमा (अरब USD)	मध्य मान (अरब USD)	CAPEX का भाग (%)
सुरंग खुदाई	\$77.4–124.8	\$101.1	41%
सुरंग-खोदक बेड़ा और निर्माण	\$2.64–4.84	\$3.74	1.5%
स्वायत्त भू-तापीय प्रणाली: 2.5 GW के 40 संयंत्र	\$80–120	\$100	40%
तीन-स्तरीय भंडारण	\$22.8–41.5	\$32.2	13%
औद्योगिक केंद्र और लॉजिस्टिक्स	\$12–26	\$19	8%
अनुसंधान, लाइसेंस और प्रशासन	\$0,1–3	\$1.5	0.6%
आकस्मिकता आरक्षित (15%)	\$31–49	\$40	16%
कुल CAPEX	\$225–365	\$295	100%

मुख्य निष्कर्ष: StarRoad की अनुमानित मध्य लागत लगभग 300 अरब अमेरिकी डॉलर है।

9.9. चरणवार वितरण (अरब USD)

लागत मद	चरण 0	चरण 1	चरण 2	चरण 3	चरण 4	चरण 5
सुरंग खुदाई	—	—	\$5	\$20	\$70	\$6
सुरंग-खोदक मशीनें	—	\$2	\$0.7	\$0.8	\$0.2	\$0.1
स्वायत्त भू-तापीय ताप-ऊर्जा प्रणाली	—	\$60	\$20	\$20	—	—
भंडारण	—	\$10	\$10	\$8	\$3	\$1
औद्योगिक केंद्र + लॉजिस्टिक्स	—	\$5	\$3	\$3	\$5	\$3
अनुसंधान और लाइसेंस	\$1.5	\$0.2	\$0.1	\$0.1	\$0.05	\$0.05
आरक्षित (15%)	\$0.23	\$11.6	\$5.8	\$7.8	\$11.7	\$1.5
प्रति चरण कुल	\$1.73	\$88.8	\$44.6	\$59.7	\$90	\$11.7
संचयी कुल	\$1.73	\$90.5	\$135.1	\$194.8	\$284.8	\$296.5

9.10. निवेश-वसूली और परिवहन लागत का विकास

इस उपखंड के सभी आँकड़े पूरी तरह सैद्धांतिक हैं।

9.10.1. प्रक्षेपण आवृत्ति और प्रति किलोग्राम लागत का विकास

StarRoad तुरंत पूरी क्षमता पर नहीं पहुँचता। नई लाइनें चालू होने, शटल बेड़ा बढ़ने और कक्षीय अवसंरचना बनने के साथ आवृत्ति और परिवहन लागत बदलती है।

भू-स्थिर कक्षा और उससे आगे की परिवहन लागत का मॉडल, अमेरिकी डॉलर/kg:

अवधि	लाइनें	प्रति वर्ष प्रक्षेपण	आवृत्ति	परिवहन लागत (\$/kg)	टिप्पणी
वर्ष 1–2, पायलट	1	12–24	माह में 1–2	\$80–120	पहले वाणिज्यिक प्रक्षेपण। संचालन का परिष्कार, ऊँची अप्रत्यक्ष लागत और छोटी उत्पादन श्रृंखला।
वर्ष 3–5	1	50–100	सप्ताह में 1–2	\$30–50	श्रृंखलाबद्ध संचालन शुरू। बेड़ा 3–5 शटल तक बढ़ता है और पैमाने से लागत घटती है।
वर्ष 6–10	1	200–300	लगभग 1 प्रतिदिन	\$10–20	पहली लाइन डिजाइन क्षमता तक पहुँचती है और रखरखाव पूरी तरह स्वचालित हो जाता है।
वर्ष 11–15	2	500–700	लगभग 2 प्रतिदिन	\$3–8	दूसरी लाइन चालू: स्थिर लागत दो त्वरकों में बँटती है।
वर्ष 16–25	3–4	1000+	3–5 प्रतिदिन	\$0.8–3	3–4 समानांतर लाइनों तक विस्तार। 1 GW से अधिक क्षमता वाले अंतरिक्ष सौर ऊर्जा संयंत्र कक्षीय युक्तिचालन और माल प्रसंस्करण को ऊर्जा देते हैं।

अवधि	लाइनें	प्रति वर्ष प्रक्षेपण	आवृत्ति	परिवहन लागत (\$/kg)	टिप्पणी
वर्ष 26+	5+	1500+	5-10 प्रतिदिन	\$0.3-1	परिपक्व अवसंरचना। अंतरिक्ष ऊर्जा संयंत्र त्वरक और कक्षीय कारखानों को चलाते हैं; ऊर्जा की सीमांत लागत लगभग शून्य हो जाती है।

9.10.2. एक प्रक्षेपण की लागत गणना (\$/kg)

हर अवधि का सूत्र: $C_{kg} = (C_{ऊर्जा} + C_{रखरखाव} + C_{मूल्यहास} + C_{संचालन}) / M_{भार}$, जहाँ:

- $C_{ऊर्जा}$ में बिजली, शीतलन और सहायक प्रणालियाँ शामिल हैं।
- $C_{रखरखाव}$ शटल और अवसंरचना का रखरखाव है।
- $C_{मूल्यहास}$ 300 अरब डॉलर CAPEX का 50 वर्षों में मूल्यहास है।
- $C_{संचालन}$ में कर्मचारी, लॉजिस्टिक्स, बीमा और अन्य संचालन व्यय हैं।
- $M_{भार}$ प्रति प्रक्षेपण 10,000 टन उपयोगी भार है।

अवधिवार अंतिम मान:

अवधि	प्रक्षेपण/वर्ष	ऊर्जा (\$/kg)	रखरखाव (\$/kg)	मूल्यहास (\$/kg)	संचालन (\$/kg)	कुल लागत (\$/kg)
वर्ष 1-2	12	1.8	6.63	50	3.57	62
वर्ष 3-5	50	1	1.25	12	0.67	14.92
वर्ष 6-10	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
वर्ष 11-15, 2 लाइनें	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
वर्ष 16-25, 3-4 लाइनें	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
वर्ष 26+, 5+ लाइनें और अंतरिक्ष सौर ऊर्जा	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. प्रक्षेपण लागत की निरपेक्ष संरचना

हर अवधि के औसत वर्ष में, 10,000 टन उपयोगी भार के लिए:

अवधि	प्रक्षेपण संख्या	प्रति प्रक्षेपण ऊर्जा (मिलियन USD)	रखरखाव (मिलियन USD)	मूल्यहास (मिलियन USD)	संचालन व्यय (मिलियन USD)	प्रति प्रक्षेपण कुल (मिलियन USD)
वर्ष 1-2	12	18	66.3	500	35.7	620
वर्ष 3-5	50	10	12.5	120	6.7	149.2
वर्ष 6-10	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
वर्ष 11-15	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
वर्ष 16-25	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2
वर्ष 26+	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. गणना की प्रमुख मान्यताएँ

1. **ऊर्जा:** शुरुआती मूल्य 0.05 अमेरिकी डॉलर/kWh; वर्ष 26+ में अंतरिक्ष सौर संयंत्रों और अपनी भू-तापीय क्षमता से 0.005 अमेरिकी डॉलर/kWh तक गिरता है।
2. **रखरखाव: पायलट अवधि** में मरम्मत, परिष्कार और अतिरिक्त कर्मचारियों के कारण ऊँचा; दसवें वर्ष तक स्वचालित क्रमिक रखरखाव बन जाता है।
3. **मूल्यहास:** 300 अरब डॉलर CAPEX को 50 वर्षों में बाँटने पर 6 अरब डॉलर/वर्ष। 250 प्रक्षेपण/वर्ष पर 24 मिलियन डॉलर प्रति प्रक्षेपण। यह अन्य आय को समायोजित न करने वाला रूढ़िवादी अनुमान है। या वार्षिक 6 अरब की वसूली को नई StarRoad शाखाओं में बढ़ते निवेश के रूप में लिया जा सकता है।
4. **अंतरिक्ष सौर ऊर्जा संयंत्र: सोलहवें** वर्ष से कक्षीय कारखानों और त्वरक के एक भाग को ऊर्जा देते, ऊर्जा लागत घटाते और ऊर्जा बिक्री की आय कई गुना बढ़ाते हैं।

9.10.5. समेकित विकास: आय बनाम लागत

अवधि	प्रक्षेपण/वर्ष	औसत बाजार मूल्य (\$/kg)	प्रक्षेपण आय (अरब USD/वर्ष)	लागत (अरब USD/वर्ष)	सकल लाभ (अरब USD/वर्ष)
वर्ष 1-2	12	\$100	12	7.44	4.56
वर्ष 3-5	50	\$39	19.5	7.45	12.04
वर्ष 6-10	250	\$9.6	24	7.8	16.2
वर्ष 11-15	600	\$3.9	23.4	7.76	15.64
वर्ष 16-25	1200	\$1.6	19.2	7.44	11.76
वर्ष 26+	2000	\$0.5	10	6.75	3.25

टिप्पणी: भू-तापीय ऊर्जा बिक्री से 35–44 अरब डॉलर/वर्ष इस तालिका में नहीं है। यह अलग आय प्रवाह अवसंरचना के मूल्यहास और संचालन व्यय को पूरा करता है।

9.10.6. लागत विकास का निष्कर्ष

StarRoad भू-स्थिर कक्षा और आगे के लिए 80–120 अमेरिकी डॉलर/kg से शुरू होता है—Falcon Heavy की निम्न कक्षा लागत 1,400 डॉलर/kg से 10–15 गुना सस्ता और Starship के 200 डॉलर/kg लक्ष्य के तुलनीय। दसवें वर्ष में 10 डॉलर/kg, पच्चीसवें में 1 डॉलर/kg और लगभग तीसवें वर्ष में 5+ लाइनों तथा अंतरिक्ष सौर ऊर्जा के साथ 0.5 डॉलर/kg से कम। इससे सौर ऊर्जा और क्षुद्रग्रह धातुएँ पृथ्वी के उद्योग के लिए आर्थिक रूप से उपलब्ध होंगी।

मुख्य निष्कर्ष: StarRoad पायलट अवधि में भी प्रतिस्पर्धी है। विस्तार और अंतरिक्ष सौर ऊर्जा का तालमेल 30 वर्षों में मूल्य को दो परिमाण क्रम घटाता है।

9.11. विकल्पों से तुलना

परियोजना	प्रकार	निवेश (CAPEX / अनुसंधान)	वसूली अवधि	लागत / LCOE	टिप्पणी
StarRoad ऊर्जा घटक: भू-तापीय प्रणाली + भंडारण	ऊर्जा	100–150 अरब अमेरिकी डॉलर	ऊर्जा बिक्री से 5–7 वर्ष	0.05 अमेरिकी डॉलर/kWh	केवल भू-तापीय उत्पादन और भंडारण स्वतंत्र ऊर्जा परियोजना के रूप में लागत वसूल होती है।
StarRoad परिवहन घटक: सुरंग, पोर्टल और शटल	परिवहन	150–200 अरब अमेरिकी डॉलर	माल आय सहित 8–12 वर्ष	1–10 अमेरिकी डॉलर/kg	त्वरक, पोर्टल और शटल। माल परिवहन से लागत वसूल और पहले घटक की ऊर्जा का उपयोग।
StarRoad संपूर्ण प्रणाली	ऊर्जा + परिवहन	लगभग 300 अरब अमेरिकी डॉलर	संयुक्त आय से 8–12 वर्ष	0.05 अमेरिकी डॉलर/kWh और 1–10 अमेरिकी डॉलर/kg	ऊर्जा और माल दोनों से आय वाली एकीकृत परियोजना।
Falcon Heavy, विकास	परिवहन	अनुसंधान पर लगभग 5 अरब अमेरिकी डॉलर	वाणिज्यिक आवृत्ति पर लगभग 10–15 वर्ष	लगभग 1,400 अमेरिकी डॉलर/kg	मौजूदा रॉकेट। यहाँ CAPEX अवसंरचना नहीं, विकास लागत है।
Starship, विकास	परिवहन	अनुसंधान पर लगभग 10 अरब अमेरिकी डॉलर	लक्षित बाजार मिलने पर लगभग 10–15 वर्ष	लक्ष्य 200 अमेरिकी डॉलर/kg; भविष्य में 50–100 अमेरिकी डॉलर/kg	विकासधीन। निवेश स्थायी अवसंरचना में नहीं, अनुसंधान में है।
ग्रैंड इंगा जलविद्युत, कांगो लोकतांत्रिक गणराज्य	ऊर्जा	80–100 अरब अमेरिकी डॉलर	15–25 वर्ष	0.03–0.05 अमेरिकी डॉलर/kWh	विशाल जलविद्युत संयंत्र; केवल ऊर्जा
बड़ा परमाणु संयंत्र, 2 इकाइयाँ और लगभग 2.4 GW	ऊर्जा	15–20 अरब अमेरिकी डॉलर	20–30 वर्ष	0.05–0.08 अमेरिकी डॉलर/kWh	सामान्य परमाणु संयंत्र; केवल ऊर्जा।

9.12. आर्थिक निष्कर्ष

मॉडल दर्शाता है कि लगभग 300 अरब अमेरिकी डॉलर के मध्य CAPEX पर StarRoad व्यवहार्य है। मुख्य कारक:

- 80–120 अरब डॉलर की भू-तापीय प्रणाली सबसे महंगा घटक है, पर स्वतंत्र ऊर्जा परियोजना के रूप में 5–7 वर्षों में लागत वसूल करती है।
- 77–125 अरब डॉलर की सुरंग खुदाई श्रृंखलाबद्ध मशीनों और आंतरिक निर्माण से तकनीकी रूप से साध्य है।
- 23–42 अरब डॉलर का भंडारण 125 डॉलर/kWh तक गिरते BESS मूल्य और सर्वोत्तम वैश्विक पद्धतियों वाली गुरुत्वीय प्रणालियों पर आधारित है।
- 0.1–3 अरब डॉलर का अनुसंधान वास्तविक प्रोटोटाइप लागत है, पूर्ण पैमाने का निर्माण नहीं।

आर्थिक आकर्षण: 0.05 डॉलर/kWh पर StarRoad केवल ऊर्जा बिक्री से 35–44 अरब डॉलर/वर्ष कमाता है। इससे संचालन व्यय पूरे होते और बड़े पैमाने के अंतरिक्ष प्रक्षेपण शुरू होने से पहले ऊर्जा निर्यात द्वारा पूंजी की वसूली संभव होती है।

10. सुरक्षा और आपात संचालन विधियाँ

StarRoad को अत्यंत उच्च विफलता-सहनशील **संचालन प्रतिमान पर बनाया गया** है, जिसमें किसी एक घटक—और अक्सर कई घटकों—की विफलता भी आपदा नहीं बनती। सुरक्षा भौतिक अतिरेक, **कार्यात्मक विभाजन और तैयारी से उड़ान तक पूरे चक्र को ढकने** वाले बहुस्तरीय प्रोटोकॉल से मिलती है।

10.1. सुरक्षा का सिद्धांत: कोई भी एकल विफलता घातक न बने

- **महत्वपूर्ण प्रणालियों में बहुस्तरीय आरक्षण।** शटल के ऑनबोर्ड रिएक्टर, त्वरक खंडों की बिजली आपूर्ति और पोर्टल के जेट-छल्लों जैसे प्रमुख घटकों में तीन या चार स्वतंत्र आरक्षित इकाइयाँ होती हैं।
- **खंडीकरण और पृथक्करण।** सुरंग को 50–200 किमी लंबे स्वायत्त खंडों में बाँटा जाता है; हर खंड की अपनी बिजली, निर्यात व्यवस्था और खंडों के बीच आपातकालीन यांत्रिक पोर्टल होते हैं। पास के खंड में निर्यात खत्म होने पर उसका पोर्टल **केवल तब बंद होता है जब वहाँ शटल न हो**, जिससे विफलता शृंखला आगे नहीं बढ़ती।
- **सक्रिय और निष्क्रिय उत्तोलन नियंत्रण।** स्थिरीकरण और असंतुलन की भरपाई करने वाली मुख्य प्रणाली **शटल पर लगी** है। विशाल अतिचालक लूप और ऑनबोर्ड बिजली इकाइयाँ ऊर्जा को माइक्रोसेकंड में पुनर्वितरित करके भू-आधारित प्रणालियों की स्थानीय विफलताओं का प्रतिकार करती हैं। अतिध्वनिक मोड़ों पर शटल का दीर्घवृत्ताकार अनुप्रस्थ काट और अपकेंद्रीय बल उसे मार्गदर्शक सतह के सापेक्ष और स्थिर रखते हैं।
- **शटल और चालक दल सर्वोपरि।** प्रक्षेपण के दौरान आपात स्थिति आने पर प्रोटोकॉल शटल को बचाने को प्राथमिकता देते हैं, भले ही सुरंग के किसी सीमित हिस्से को क्षति पहुँचे।

10.2. मुख्य जोखिम और उनसे सुरक्षा

जोखिम	कारण	सुरक्षा उपाय और प्रोटोकॉल
अतिध्वनिक गति पर उत्तोलन समाप्त होना या चुंबकीय क्षेत्र में असमानता	बिजली खंड की विफलता या वाइंडिंग की क्षति।	1. नैनोसेकंड प्रतिक्रिया वाला ऑनबोर्ड स्थिरीकरण। 2. प्रेरणीय ब्रेकिंग: अतिध्वनिक गति पर शटल सुरंग की निष्क्रिय वाइंडिंग में धारा उत्पन्न करता है, जिससे स्थिरकारी प्रभाव बनता है। 3. खंडीकरण टक्कर और क्षति को एक ही खंड तक सीमित रखता है।
पोर्टल की गैस-गतिशील अवरोधक परत की विफलता	एक या अधिक जेट-छल्लों की विफलता।	1. तीन आरक्षित छल्लों की प्रणाली , हर छल्ले के चारों ओर विस्फोट-रोधी सुरक्षा। 2. प्रस्थान से 60 सेकंड पहले होने वाली जाँच मुख्य शटर खोले बिना गैस-शंकु बनाती है; खराब छल्ले अलग कर दिए जाते हैं। 3. कोई भी त्रुटि मिलने पर Alarm-1 प्रक्षेपण रद्द करता है।
सुरंग के निर्यात का समाप्त होना	दुर्घटना या क्षति से दाब बढ़ना।	1. पूरी सुरंग में दाब-संवेदकों का जाल। 2. क्षति सीमित रखने के लिए खंडों के बीच आपातकालीन पोर्टल। 3. शटल के आगे दाब बढ़ने का पता लगते ही स्वचालित आपात-रोक प्रोटोकॉल—Alarm-1 या Alarm-2।
ऐसी अवस्था में विफलता मिलना जब रुकना संभव न रहे	त्वरण मार्ग के अंतिम 60–100% भाग में किसी गंभीर त्रुटि का पता लगना।	Alarm-3: अधिकतम, 8g तक , ब्रेकिंग गति घटाती है। प्राथमिकता शटल को उपकक्षीय पथ पर पहुँचाने की होती है, भले ही पोर्टल नष्ट हो जाए। बाद में समुद्र में सुरक्षित उतरने के लिए वाहन हल्का करने हेतु पेलोड अलग कर दिया जाता है।

10.3. आपातकालीन प्रोटोकॉल का क्रम

- **Alarm-1, प्रक्षेपण-पूर्व आपात स्थिति।** शटल चलने से पहले सक्रिय होता है, यदि प्रणाली निर्यात की हानि, चुंबकीय क्षेत्र में गड़बड़ी, पोर्टल के किसी छल्ले की विफलता या गैस-शंकु का असामान्य गठन **पहचानती है**। कार्रवाई: प्रक्षेपण तुरंत रद्द करना, खराब सुरंग खंडों को पोर्टलों से अलग करना, जाँच और मरम्मत।
- **Alarm-2, मार्ग के शुरुआती या मध्य भाग की आपात स्थिति, 0–60%।** प्रस्थान के बाद तब सक्रिय होता है जब आगे के पथ में **कोई त्रुटि मिले**। कार्रवाई: आपात ब्रेकिंग और सुरंग के भीतर रुकना। त्रुटि आगे हो तो शटल अपनी शक्ति से आरंभिक बिंदु पर लौटता है। अन्यथा रुकने के बाद उसे मौजूदा खंड में पोर्टलों से अलग किया जाता है; खंड में हवा भरी जाती है और चालक दल व यात्री सेवा-सुरंग तथा सतही शाफ्टों से बाहर निकलते हैं।

- **Alarm-3, मार्ग के अंतिम भाग की आपात स्थिति, 60–100%।** तब सक्रिय होता है जब सुरंग में रुकना असंभव हो और पोर्टल या अंतिम खंड की विफलता संभावित हो। **कार्रवाईयाँ:**

- 1) गति घटाने के लिए अधिकतम आपात ब्रेकिंग, 8g तक।
- 2) शटल की संरचनात्मक अखंडता सर्वोपरि; पोर्टल खुला रहता है।
- 3) आपात उपकक्षीय पथ पर जाना और वाहन हल्का करने के लिए पथ के सर्वोच्च बिंदु पर माल अलग करना।
- 4) सभी मुख्य और आरक्षित प्रणालियों का उपयोग करके हिंद या प्रशांत महासागर के निर्धारित क्षेत्र में उतरना। शटल की संरचना अतिभार और पोर्टल के आंशिक विनाश को सहने के लिए बनाई जाती है।

10.4. संरचनात्मक उत्तरजीविता के उपाय

- **शटल।** भविष्य के लंबे संस्करण में दो स्वतंत्र ऑनबोर्ड रिएक्टर; वितरित अतिचालक उत्तोलन प्रणाली; और अत्यधिक भार तथा तापीय आघात के लिए सुदृढ़ ढाँचा।
- **उच्च-ऊँचाई वायुमंडलीय पोर्टल।** विस्फोट-रोधी आवरणों में तीन स्वतंत्र वलयाकार जेट इंजन। यांत्रिक शटर आंशिक रूप से बिगड़ी गैस-अवरोधक परत की आघात तरंग सह सकता है। पोर्टल की भीतरी दीवारों में कीपाकार छिद्र तुरंत दाब घटाते हैं और गैस को निष्क्रिय रूप से आरक्षित निर्वात कक्षों में निकाल देते हैं। इससे सुरंग और पोर्टल में वायुमंडलीय गैस का प्रवेश न्यूनतम रहता है, पूरे पोर्टल तंत्र की विफलता के बाद भी क्षति सीमित होती है और अतिध्वनिक शटल की दाब-तरंग संरचना को फाड़ नहीं पाती।
- **सुरंग।** खंडीकरण, आपात पोर्टल, दोहरी बिजली प्रणालियाँ और आपात निकासी व मरम्मत के लिए तकनीकी सेवा-सुरंग।

10.5. ध्वनिक और आघात-तरंग प्रभाव

अतिध्वनिक गति से बाहर निकलता शटल शक्तिशाली N-तरंग वाला ध्वनि-विस्फोट उत्पन्न करता है। तरंग की अधिकांश ऊर्जा पथ के साथ एक संकरी पट्टी में चलती है, इसलिए पोर्टल के निकट भू-आधारित अवसंरचना पर प्रभाव घटता है। फिर भी उसके चारों ओर बंद स्वच्छता-सुरक्षा क्षेत्र बनाया जाता है; उसका दायरा मॉडलिंग से तय और वास्तविक पैमाने के परीक्षणों से पुष्ट किया जाता है।

स्वीकार्य सतही प्रभाव के लिए शीर्ष अतिदाब Δp की दो सीमाएँ निर्धारित हैं:

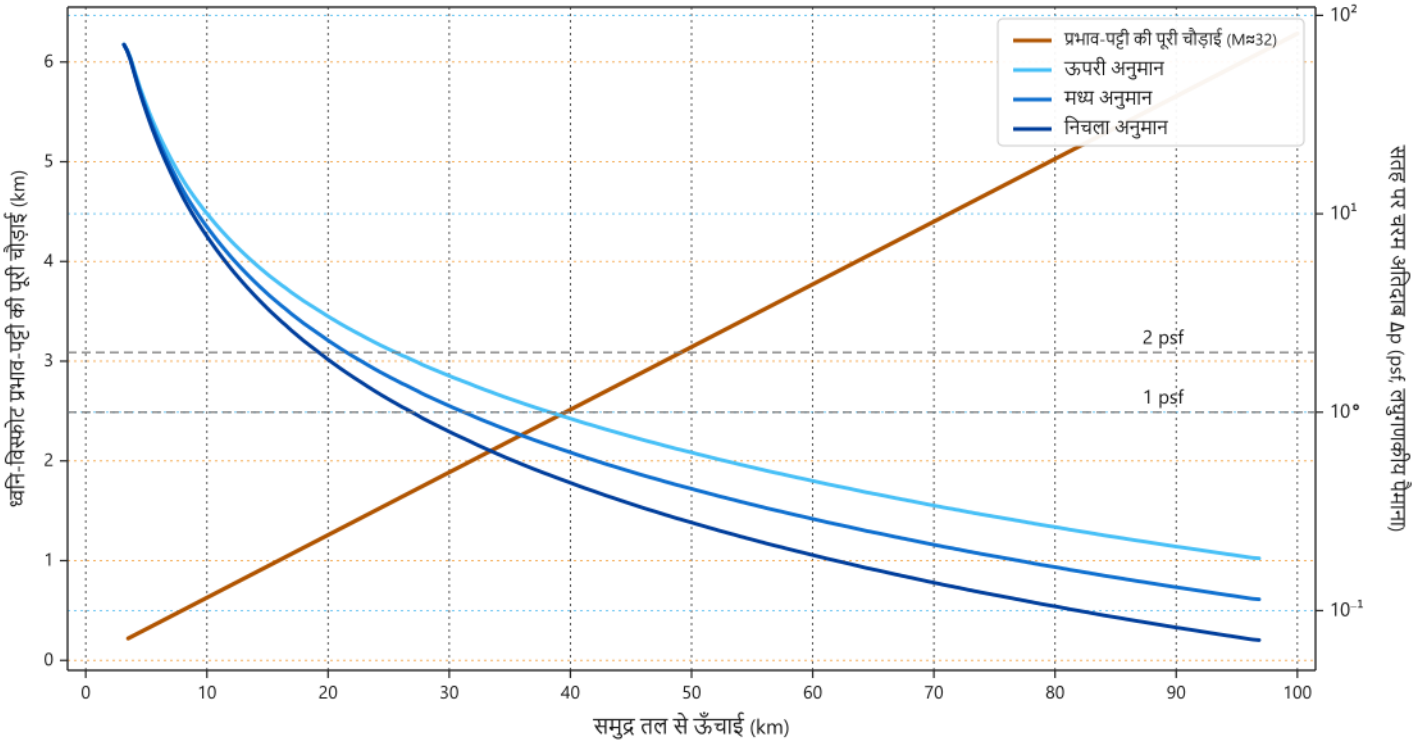
$\Delta p \leq 2 \text{ psf}$, लगभग 96 Pa: इमारतों और काँच को क्षति की संभावना नगण्य मानी जाती है।

$\Delta p \leq 1 \text{ psf}$, लगभग 48 Pa: आबादी वाले क्षेत्रों का लक्ष्य; शिकायत का न्यूनतम जोखिम और कोई क्षति नहीं।

मार्ग की बनावट और परिचालन सीमाएँ—बहिष्करण गलियारा, मौसम की उपयुक्त अवधियाँ और ऊँचाई प्रतिबंध—इतने सुरक्षा-अंतर के साथ चुने जाते हैं कि ये सीमाएँ सुनिश्चित रहें।

StarRoad: ऊँचाई के साथ ध्वनि-विस्फोट प्रभाव-पट्टी की चौड़ाई और अतिदाब

Δp का अनुमानित परिसर (स्पेस शटल के आँकड़ों से अंशांकित)
सभी गणनाएँ Mach $M \approx 32$ और आघात-तरंग प्रसार कोण $\mu \approx 1.8^\circ$ मानती हैं



निष्कर्ष: StarRoad की सुरक्षा इस विश्वास पर आधारित नहीं है कि विफलता हो ही नहीं सकती। वह हर विफलता प्रकार को संभव मानता है और उसके लिए पहले से निर्धारित, स्वचालित प्रतिक्रिया रखता है। यही इस अवधारणा को काल्पनिक मार्ग से सुविचारित, विश्वसनीय और सबसे बढ़कर भरोसेमंद अभियांत्रिकी प्रणाली में बदलता है।

11. सांस्कृतिक और मनोवैज्ञानिक प्रभाव

तकनीकी और आर्थिक प्रभाव से आगे StarRoad संस्कृति और सामूहिक चेतना बदलेगा। हर प्रक्षेपण तकनीकी कार्य से विशाल सार्वजनिक, लगभग पवित्र घटना बनेगा।

11.1. एक परिघटना के रूप में दृश्य

शटल का अतिध्वनिक निकास मानव-निर्मित खगोलीय घटना 'सौर बाण' बनाएगा। सुरक्षित स्थान से क्षितिज पर तत्काल चमक, फिर आकाश में सीधी रेखा खींचती तेज चमकीली प्लाज़्मा लकीर दिखेगी। कुछ दस सेकंड बाद इंजन गर्जन नहीं, विनाशकारी दोहरा सोनिक बूम आएगा—मानो मशीन नहीं, पूरा उड़ता नगर ध्वनि और ताप अवरोध पार कर रहा हो। रात में यह गतिमान धूमकेतु और तकनीकी ध्रुवप्रभा जैसा होगा।

11.2. मनोवैज्ञानिक और प्रतीकात्मक अनुगूँज

- **प्रत्यक्ष पैमाना।** अमूर्त कार्यक्रम सैकड़ों किमी से दिखने वाला दैनिक या साप्ताहिक दृश्य बनकर विस्तार को चार्ट से जीवन का भौतिक तथ्य बनाता है।
- **नया आदिरूप।** पृथ्वी से अंतरिक्ष की ओर छोड़ा विशाल प्रकाशमान बाण प्रगति, इच्छा और आकांक्षा का प्रतीक बनकर पुरानी खड़ी रॉकेट छवि की जगह अंतरिक्ष परिवहन गलियारों का युग दिखाता है।
- **एकता और गौरव।** जैसे Soyuz और Apollo ने दुनिया को स्क्रीन के सामने जोड़ा, नियमित उड़ानें विशाल लक्ष्यों पर मानव सहयोग की वैश्विक मीडिया घटना होंगी।

11.3. सामाजिक-आर्थिक परिणाम

- **पर्यटन। निषेध क्षेत्र की सुरक्षित सीमा पर दर्शन परिसर नया अंतरिक्ष पर्यटन बनेंगे; आकर्षण प्राचीन विश्व के आश्चर्यों जैसा हो सकता है।**
- **शिक्षा प्रेरणा।** यह दृश्य लाखों बच्चों को भौतिकी, अभियांत्रिकी और अंतरिक्षयानिकी पढ़ने की अनुपम प्रेरणा देगा।

- **अंतरिक्ष का रहस्य-हरण।** नियमित, पूर्वानुमेय औद्योगिक प्रक्षेपण असाधारणता और मृत्यु-जोखिम की आभा हटाकर इसे विशाल किंतु सामान्य रसद कार्य दिखाता है।

StarRoad अंतरिक्ष पहुँच की भौतिक अवसंरचना के साथ वह सांस्कृतिक **कथा और भावनात्मक आधार बनाएगा जिससे** मानवता पालने से बाहर अपना भविष्य बनाने वाली सभ्यता की भूमिका स्वीकारे। सौर बाण का नियमित प्रकट होना याद दिलाएगा कि तारों का मार्ग केवल खुला नहीं, उपयोग में है।

12. निष्कर्ष

StarRoad अभियांत्रिकी महापरियोजना से अधिक है। यह औद्योगिक अंतरिक्ष सभ्यता में परिवर्तन की रणनीति है। 'रॉकेट' प्रतिमान से 'गलियारा' प्रतिमान की ओर जाकर परियोजना दो मुख्य बाधाओं—वहन-भार आपूर्ति लागत और कम परिवहन क्षमता—को पार करने का मार्ग देती है।

अतिध्वनिक गलियारा ऊर्जा, कृषि, उद्योग, रसद और अंतरिक्ष तकनीकों को जोड़ने वाली रीढ़ बनता है। अफ्रीका को भी केवल कच्चा माल निर्यात करने के बजाय अपने भूगोल और संसाधनों से अंतरिक्ष तक मार्ग बनाकर औद्योगिक और तकनीकी छलाँग लगाने का अवसर मिलता है।

सिद्ध तकनीकों का एकीकरण और विस्तार करके StarRoad ऐसी अर्थव्यवस्था की नींव रखता है जिसमें सौरमंडल के संसाधन पृथ्वी की समस्याएँ हल करने के लिए उपलब्ध होते हैं, जबकि अवसंरचना स्वयं मानवता के भविष्य का बीमा और प्रस्थान-मंच बनती है। इसे साकार करने के लिए अभूतपूर्व अंतरराष्ट्रीय सहयोग, दीर्घकालिक निवेश और अभियांत्रिकी संकल्प चाहिए; प्रतिफल होगा वास्तविक अंतरिक्ष युग की कुंजी, लगभग असीम पृथ्वी-बाह्य संसाधन और प्रचुर ऊर्जा।