

StarRoad প্রকল্প: পৃথিবী থেকে মহাকাশে অতিভারী তড়িৎচৌম্বক উৎক্ষেপণ করিডর

সূচিপত্র

পরিভ্রমণ: [শুরু](#) | [সূচিপত্র](#) | [শেষ](#)

[১. বিবরণ, প্রধান বৈশিষ্ট্য, সক্ষমতা ও দর্শন](#)

[১.১. প্রকল্পের মূল দর্শন](#)

[১.২. সক্ষমতা](#)

[২. প্রযুক্তিগত, অর্থনৈতিক, ভৌগোলিক ও কৌশলগত সুবিধা এবং ভিত্তি](#)

[২.১. প্রযুক্তিগত](#)

[২.২. অর্থনৈতিক](#)

[২.৩. ভৌগোলিক](#)

[২.৪. কৌশলগত](#)

[৩. শিল্প ও প্রযুক্তিগত ভিত্তি](#)

[৩.১. চৌম্বকীয় উত্তোলন ও ত্বরণ \(ম্যাগলেভ\)](#)

[৩.২. অতিপরিবাহী প্রযুক্তি ও বিতরণকৃত স্থাপত্য](#)

[৩.৩. স্পন্দিত শক্তি](#)

[৩.৪. বায়ুশূন্যতা প্রযুক্তি](#)

[৩.৫. অতিধ্বনিক বায়ুগতিবিদ্যা ও তাপীয় সুরক্ষা](#)

[৩.৬. পারমাণবিক শক্তি ব্যবস্থা](#)

[৩.৭. সুডঙ্গ নির্মাণ](#)

[৩.৮. স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপশক্তি ব্যবস্থা](#)

[৩.৯. অতিধ্বনি দহন](#)

[৩.১০. প্রবেশপথের বদ্ধ জ্বালানি চক্র](#)

[৩.১১. প্রযুক্তি যাচাইয়ের কৌশল](#)

[৪. StarRoad-এর উপাদান ও প্রযুক্তির ধাপভিত্তিক বিস্তারিত বিবরণ](#)

[৪.১. ত্বরণ সুডঙ্গ ও তার অবকাঠামো](#)

[৪.২. বায়ুমণ্ডলীয় গেটওয়ে \(উচ্চভূমির টার্মিনাল\)](#)

[৪.৩. শাটল \(AstroLiner\)](#)

[৫. উৎক্ষেপণ প্রস্তুতি থেকে অবতরণের পর রক্ষণাবেক্ষণ পর্যন্ত পরিচালনাচক্র](#)

[৫.১. প্রস্তুতি ও উৎক্ষেপণ](#)

[৫.২. সুডঙ্গে ত্বরণ](#)

[৫.৩. বায়ুমণ্ডলীয় গেটওয়ে দিয়ে প্রস্থান](#)

[৫.৪. বায়ুমণ্ডল অতিক্রম](#)

[৫.৫. মহাকাশে প্রবেশ ও কক্ষীয় পরিচালনা](#)

[৫.৬. কক্ষপথ ত্যাগ ও প্রত্যাবর্তন](#)

[৫.৭. সমুদ্রে অবতরণ](#)

[৫.৮. টেনে নেওয়া ও রক্ষণাবেক্ষণ](#)

[৬. বাস্তবায়ন, সময়সূচি, প্রয়োজনীয়তা ও শিল্পকেন্দ্র](#)

[৬.১. প্রকল্পের ধাপ](#)

[৬.২. শিল্পকেন্দ্র](#)

[৬.৩. সামগ্রিক সময়সীমা](#)

[৭. সমাধান করা সমস্যা ও কাজ](#)

[৭.১. বৈশ্বিক অতিউষ্ণায়ন](#)

[৭.২. অর্থনৈতিক কাজ](#)

[৭.৩. কৌশলগত লক্ষ্য](#)

- 7.4. [প্রযুক্তিগত অনুঘটক](#)
- 7.5. [শক্তি ও তাপীয় স্বনির্ভরতা](#)
- 7.6. [কার্বন পদচিহ্ন](#)
- 7.7. [জলতাপীয় প্রধান খালের সামাজিক ও পরিবেশগত সম্ভাবনা](#)
- 7.8. [জ্বালানি নেটওয়ার্ক](#)
- 7.9. [অর্থনৈতিক ধমনী হিসেবে StarRoad](#)
- 7.10. [গুরুত্বপূর্ণ অবকাঠামোর নিরাপত্তা](#)
- 7.11. [স্থান নির্বাচন ও সম্প্রসারণক্ষমতা](#)
- 7.12. [মহাদেশপারি প্রকল্পের রাজনৈতিক ও আইনি সমন্বয়](#)
- 7.13. [পণ্যপ্রবাহের ক্রমবিকাশ](#)

8. [বাজার ও কক্ষীয় রসদ](#)

- 8.1. [অতি-ভারী উৎক্ষেপণের চাহিদার সমস্যা](#)
- 8.2. [প্রাথমিক বাজার: মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ ও কক্ষীয় ডেটা সেন্টার](#)
- 8.3. [মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুতের জলবায়ু ও শিল্পগত যুক্তি](#)
- 8.4. [কক্ষীয় অবস্থান: GEO ও EML4/5](#)
- 8.5. [প্রথম ধাপ: AstroLiner-S-এর সরাসরি যাত্রা](#)
- 8.6. [পরিণত ধাপ: মাইক্রোওয়েভ রিলে ও সেবা অবকাঠামো](#)
- 8.7. [পরিচালন পরিবেশ অনুযায়ী পরিবহন বিভাজন](#)
- 8.8. [পরিণত রসদে AstroLiner-এর ভূমিকা](#)
- 8.9. [আন্তঃকক্ষীয় পরিবহনযান ও টাগ](#)
- 8.10. [পৃথিবী ও অন্যান্য গ্রহে অবতরণ](#)
- 8.11. [মানসম্মত মডিউল](#)
- 8.12. [কক্ষীয় অবকাঠামোর স্তরবিন্যাস](#)
- 8.13. [কক্ষীয় মহাকাশযান নির্মাণকেন্দ্র](#)
- 8.14. [কক্ষীয় ও চন্দ্র বসতি](#)
- 8.15. [রসদের উপমা: সামুদ্রিক নেটওয়ার্ক হিসেবে মহাকাশ](#)
- 8.16. [পণ্যপ্রবাহের অর্থনীতি](#)
- 8.17. [বাজার ও রসদ উন্নয়নের ধাপ](#)
- 8.18. [বিবর্তনের সম্ভাবনা: StarRoad-এর উত্তরসূরি](#)
- 8.19. [গ্রহ-প্রকৌশলের সম্ভাবনা: একক সম্পদব্যবস্থা হিসেবে সৌরজগত](#)
- 8.20. [কৌশলগত উপসংহার](#)

৯. [প্রকল্পের অর্থনৈতিক মডেল](#)

- 9.1. [পদ্ধতি ও প্রধান অনুমান](#)
- 9.2. [আফ্রিকান পরিবেশে খননব্যয়](#)
- 9.3. [নিজস্ব উৎপাদনের টানেল খননযন্ত্র বহর](#)
- 9.4. [স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপশক্তি ব্যবস্থা](#)
- 9.5. [শক্তি সঞ্চয় ব্যবস্থা](#)
- 9.6. [শিল্পকেন্দ্র ও সরবরাহব্যবস্থা](#)
- 9.7. [গবেষণা ও উন্নয়ন এবং নমুনা নির্মাণ — পর্যায় ০](#)
- 9.8. [চূড়ান্ত CAPEX সারাংশ](#)
- 9.9. [পর্যায়ভিত্তিক বণ্টন \(বিলিয়ন USD\)](#)
- 9.10. [বিনিয়োগ-ফেরত ও পরিবহন খরচের বিবর্তন](#)
- 9.11. [বিকল্পের সঙ্গে তুলনা](#)
- 9.12. [অর্থনৈতিক সিদ্ধান্ত](#)

১০. [নিরাপত্তা ও জরুরি পরিচালন পদ্ধতি](#)

- 10.1. [নিরাপত্তার মূলনীতি: একটি মাত্র ক্রটিও যেন প্রাণঘাতী না হয়](#)
- 10.2. [প্রধান ঝুঁকি ও প্রতিরক্ষা ব্যবস্থা](#)
- 10.3. [জরুরি প্রোটোকলের ক্রম](#)

[10.4. টিকে থাকার জন্য কাঠামোগত ব্যবস্থা](#)

[10.5. শব্দ ও অভিঘাত তরঙ্গের প্রভাব](#)

[১১. সাংস্কৃতিক ও মনস্তাত্ত্বিক প্রভাব](#)

[11.1. একটি ঘটনা হিসেবে দৃশ্য](#)

[11.2. মনস্তাত্ত্বিক ও প্রতীকী অনুরণন](#)

[11.3. সামাজিক-অর্থনৈতিক ফলাফল](#)

[১২. উপসংহার](#)

১. বিবরণ, প্রধান বৈশিষ্ট্য, সক্ষমতা ও দর্শন

StarRoad হলো পৃথিবী থেকে মহাকাশ পর্যন্ত দীর্ঘপথের মূল পরিবহন ব্যবস্থা, যার কেন্দ্রে ২,০৫০ কিলোমিটারের বেশি দীর্ঘ নির্বাত চৌম্বক-উত্তোলন ত্বরণযন্ত্র। এটি যানে প্রতিক্রিয়াশীল উৎক্ষেপণ প্রপেল্যান্ট না নিয়ে ১৫,০০০ টন পর্যন্ত স্বয়ংক্রিয়, পুনর্ব্যবহারযোগ্য অতিভারী শাটলকে মহাকাশে পাঠানোর জন্য নকশা করা।

১.১. প্রকল্পের মূল দর্শন

মহাকাশ উৎক্ষেপণ দৃষ্টান্তে পরিবর্তন:

- **জড়তায় বায়ুমণ্ডল অতিক্রম।** StarRoad ধাক্কা ও বায়ুগতীয় দক্ষতা দিয়ে বায়ুমণ্ডল জয় করার বদলে, নির্বাতে প্রায় ১১ কিমি/সেকেন্ড অতিধ্বনিক বেগে ত্বরিত শাটলের ভরে সঞ্চিত গতিশক্তি ব্যবহার করে। বায়ুমণ্ডল সম্পূর্ণভাবে জড়তার সাহায্যে ৫০-৬০ সেকেন্ডে অতিক্রম করা হয়।
- **ভর একটি সুবিধা।** হাজার হাজার টনের বড় ভর শত্রু না থেকে বিপুল গতিশক্তির বাহক হয় এবং একই সঙ্গে কাঠামো ও তাপীয় সুরক্ষায় অতিশক্তিশালী, অবাধ্য উপাদান ব্যবহারের সুযোগ দেয়।
- **কাজের বিভাজন।** শক্তি অবকাঠামো, ত্বরণ ও সূক্ষ্ম নিয়ন্ত্রণ স্থল কমপ্লেক্সের দায়িত্বে দিয়ে একটি স্থির প্রকৌশল ব্যবস্থা করা হয়। শাটল পণ্য পরিবহন, কক্ষীয় কৌশল এবং ফেরার জন্য অনুকূলিত বিশেষ পরিবহন মডিউল হয়।
- **সম্প্রসারণযোগ্য শিল্পায়ন।** ব্যবস্থাটি একক স্থাপনা নয়, মহাকাশ 'রেলপথের' প্রথম লাইন হিসেবে পরিকল্পিত; সমান্তরাল, অতিরিক্ত ও বিকল্প সুড়ঙ্গ নির্মাণের সুযোগে সক্ষমতা দ্রুত বাড়ে এবং ব্যয় কমে।

১.২. সক্ষমতা

- **ভূস্থির কক্ষপথের (GEO) বাইরে সরাসরি পরিবহন।** প্রায় ১১ কিমি/সেকেন্ড প্রাথমিক বেগের সঙ্গে পৃথিবীর বিষুবীয় ঘূর্ণন থেকে প্রায় ০.৪৬৫ কিমি/সেকেন্ড যোগ হলে শাটল পৃথিবী-সূর্য বা পৃথিবী-চন্দ্র L1/L2 লাগ্রাঞ্জ বিন্দুর মতো উচ্চ-শক্তির গন্তব্যে অতি সামান্য সংশোধনে প্রায় সরাসরি পৌঁছাতে পারে। এতে নিম্ন পৃথিবী কক্ষপথে টেনে নেওয়া ও পুনরায় জ্বালানি ভরার দরকার থাকে না।
- **বহনক্ষমতা।** একটি উড্ডয়নে হাজার হাজার টন পৌঁছে দেওয়া যায়। ফলে গিগাওয়াট-শ্রেণির কক্ষীয় বিদ্যুৎকেন্দ্র, মহাকাশ বসতি, সম্পদ আহরণ, প্রক্রিয়াকরণ, সংযোজন ও উৎপাদন কমপ্লেক্স, গ্রহ প্রতিরক্ষা ব্যবস্থা এবং আন্তঃগ্রহ মহাকাশযান নির্মাণ অর্থনৈতিকভাবে সম্ভব হয়।
- **ব্যয়।** পূর্ণ ব্যবহারে উচ্চ কক্ষপথে হিসাব করা পরিবহন ব্যয় প্রতি কিলোগ্রামে \$১-১০ পর্যন্ত নামতে পারে—বর্তমান ও ভবিষ্যৎ রকেট ব্যবস্থার চেয়ে কয়েক মাত্রা কম।

২. প্রযুক্তিগত, অর্থনৈতিক, ভৌগোলিক ও কৌশলগত সুবিধা এবং ভিত্তি

২.১. প্রযুক্তিগত

বিকল্প কক্ষীয় উৎক্ষেপণ ধারণার অধিকাংশই মূলত নির্মাণযোগ্য কি না, তা দিয়ে নয়; বরং তাদের পরিচালন চাহিদা—অবিরাম চালনা, সক্রিয় গতিশীল সহায়তা, অবাস্তবভাবে উচ্চ নির্ভরযোগ্যতা এবং ব্যর্থতার বিধ্বংসী পরিণতি—দিয়ে সীমাবদ্ধ। সক্রিয় গতিশীল মহাকাঠামো চালু রাখতে নিরবচ্ছিন্ন শক্তি ও ক্রমাগত গতিশীল স্থিতিকরণ লাগে; শক্তি বা নিয়ন্ত্রণ হারালে কাঠামো সহায়তা হারায় এবং সম্ভাব্য বিধ্বংসী ব্যর্থতায় যায়। দীর্ঘ বাহ্যিক নির্বাত-নল ব্যবস্থাও সিল, খণ্ড-বিচ্ছিন্নতা ও তাপীয় স্থিতিশীলতার কঠোর চাহিদা আরোপ করে। StarRoad আলাদা, কারণ এর গুরুত্বপূর্ণ অবকাঠামো ভূগর্ভস্থ, স্পন্দিত পরিচালনা সম্ভব, দুর্ঘটনা স্থানীয়ভাবে সীমিত থাকে এবং ব্যবস্থা নিষ্ক্রিয়ভাবেই স্থিতিশীল। তাই পৃথিবীর বাইরে পণ্য পরিবহনের প্রধান

ব্যবস্থার মধ্যে এটিই ন্যূনতম বাস্তবায়নযোগ্য রূপ। নির্বাহিত পরিবহন, অতিধ্বনিক বায়ুগতিবিদ্যা, স্পন্দিত শক্তি ও অতিপরিবাহীর মতো বাস্তব প্রযুক্তিকে StarRoad-এর মাপে মানিয়ে নেওয়াও ধারণাটিকে বাস্তবসম্মত করে।

২.২. অর্থনৈতিক

মূল ব্যয় হলো মূলধনী নির্মাণ ও শক্তি। ব্যবহারশেষে ফেলে দেওয়া ধাপ না থাকা এবং উৎক্ষেপণে কার্যকর তরলের নগণ্য ব্যবহারে পরিচালন ব্যয় আমূল কমে। প্রকল্পটি আঞ্চলিক উন্নয়ন, নতুন শক্তি ব্যবস্থা ও উচ্চ-প্রযুক্তি গুচ্ছও উৎসাহিত করে।

StarRoad-এর অর্থনৈতিক বাস্তবতা মূল্যায়নে বিশ্ব পরিবহন ও শক্তি অবকাঠামোর মাপ বিবেচনা করতে হবে। বার্ষিক বৈশ্বিক পণ্যপ্রবাহে কয়েক মিলিয়ন টন খুব সামান্য অংশ, আর শত শত বিলিয়ন ডলারের মূলধনী বিনিয়োগ গ্রহ-পরিসরের অবকাঠামোর জন্য স্বাভাবিক। তাই StarRoad বিদ্যমান পরিবহন ব্যবস্থার সঙ্গে প্রতিযোগিতা করে না; এটি উচ্চ-শক্তির করিডরের ক্ষেত্রটি পূরণ করে, যা মোট বৈশ্বিক পণ্যপ্রবাহে তুলনামূলক সামান্য প্রভাব রেখে নতুন সক্ষমতা যোগ করে।

২.৩. ভৌগোলিক

গ্যাবনের ন্যাঙ্গা নদীর মোহনা থেকে কঙ্গো গণতান্ত্রিক প্রজাতন্ত্রের মোহি পর্বত ও দক্ষিণ মালভূমি পর্যন্ত পথটি প্রায় আদর্শ:

- **বিষুবরেখা।** পৃথিবীর ঘূর্ণন থেকে সর্বোচ্চ বেগলাভ এবং কক্ষীয় নতির সর্বনিম্ন সংশোধন।
- **দৃষ্টিরেখা।** মধ্য আফ্রিকার কম জনবসতিপূর্ণ অঞ্চল দিয়ে তুলনামূলক সরল পথ।
- **গেটওয়ের উচ্চতা।** ৩,৪০০ মিটার উচ্চতা প্রস্থানে বায়ুমণ্ডলীয় ঘনত্ব ৩০% কমায়ে এবং তাপীয় ও অভিঘাত চাপ হ্রাস করে।
- **ভূকম্পীয় স্থিতি।** এই এলাকায় পূর্ব আফ্রিকান রিফটের কার্যকলাপ খুব কম।
- **সরবরাহ ব্যবস্থা।** উৎপাদন ও শাটল পুনরুদ্ধারের জন্য পথটি সমুদ্র থেকে শুরু হয়ে উচ্চভূমিতে শেষ হয়।
- **সর্বোত্তম পথ ও স্থান:** গ্যাবনের ন্যাঙ্গা নদীর মোহনা থেকে কঙ্গো গণতান্ত্রিক প্রজাতন্ত্রের মোহি পর্বত পর্যন্ত প্রায় ২,০৫০ কিমি। গ্যাবন উপকূল থেকে উৎক্ষেপণ প্রায় ৩°-এর আদর্শের কাছাকাছি বিষুবীয় কক্ষীয় নতি দেয়, ফলে ভূস্থির কক্ষপথ ও লাগ্রাঞ্জ বিন্দুতে সরাসরি যাওয়া যায় এবং আন্তঃগ্রহ স্থানান্তর ব্যয় কমে। গেটওয়ে কমপ্লেক্সটি **মোহি পর্বতে প্রায় ৩,৪০০ মি উচ্চতায় থাকবে এবং বিস্তৃত দক্ষিণ মালভূমি সম্প্রসারণের জন্য সংরক্ষিত থাকবে।** স্থানের বৈশিষ্ট্য উৎকৃষ্ট: উচ্চতা, সমতল ভূমি, বসতি থেকে ২০ কিমির বেশি দূরত্ব এবং টাঙ্গানিকা ও কিভু হ্রদের নিকটতা।
- **বিকল্প স্থান।** কঙ্গো গণতান্ত্রিক প্রজাতন্ত্রের কিটম্ব বন্দর থেকে **মোহি পর্বত পর্যন্ত বিকল্প পথ প্রায় ১,৮৫০ কিমি** এবং পুরোপুরি একটি দেশের মধ্যে থাকায় সরবরাহ ও আইনি সমন্বয় সহজ হবে। তবে এতে প্রায় ১৩° **কক্ষীয় নতি হবে** এবং পণ্যকে ০° ভূস্থির কক্ষপথ বা লাগ্রাঞ্জ বিন্দুতে পাঠাতে অতিরিক্ত ~২০০-৩০০ মি/সেকেন্ড ডেল্টা-ভি লাগবে। এটি প্রতি উৎক্ষেপণে **বহন-ভরের প্রায় ২-৪% হারানোর সমান।** তাই অধিক জটিল হলেও প্রায় ৩° নতির আন্তর্জাতিক বিষুবীয় **পথ বেছে নেওয়া**, করিডরের **পূর্ণ** সেবা-মেয়াদে সর্বোচ্চ অর্থনৈতিক দক্ষতা এবং কক্ষীয় অবকাঠামোর প্রতিটি গুরুত্বপূর্ণ কেন্দ্রে সরাসরি প্রবেশ নিশ্চিত করার কৌশলগত সিদ্ধান্ত।

২.৪. কৌশলগত

সব আবহাওয়ায় সার্বক্ষণিক মহাকাশ পরিবহন করিডর তৈরি। দীর্ঘমেয়াদে এমন পথের নেটওয়ার্ক বৈশ্বিক অবকাঠামো, ব্যাপক সরিয়ে নেওয়ার সম্ভাবনাসম্পন্ন সভ্যতায় সুরক্ষা এবং শক্তিবিভিড় ও তাপ উৎপাদনকারী শিল্পকে পৃথিবীর বাইরে নেওয়া পূর্ণাঙ্গ মহাকাশ শিল্পায়নের ভিত্তি হবে।

রকেট ব্যবস্থা দাবিকৃত অত্যন্ত কম বহন-ব্যয় অর্জন করলেও রকেট উৎক্ষেপণ সীমিত সক্ষমতার বিচ্ছিন্ন ঘটনা থাকে। এই অর্থে, প্রতি কিলোগ্রামের মূল্য যাই হোক, রকেট ব্যবস্থা প্রকৃতিগতভাবে অভিযানভিত্তিক সরবরাহ। StarRoad এমন একটি অবকাঠামো করিডর, যার লক্ষ্য শুধু একটি উৎক্ষেপণের ব্যয় কমানো নয়, বরং স্থিতিশীল ও অবিরাম পণ্যপ্রবাহ গড়া।

৩. শিল্প ও প্রযুক্তিগত ভিত্তি

StarRoad-এর জন্য পদার্থবিদ্যার নতুন সূত্র আবিষ্কার দরকার নেই; এটি বিদ্যমান ও উদীয়মান প্রযুক্তির প্রকৌশল সমন্বয়ের চূড়ান্ত রূপ:

৩.১. চৌম্বকীয় উত্তোলন ও ত্বরণ (ম্যাগলেভ)

এটি চীন, জাপান ও জার্মানির অভিজ্ঞতা ব্যবহার করে। চীনা ম্যাগলেভ পরীক্ষায় এক টনকে দুই সেকেন্ডে ০ থেকে ৭০০ কিমি/ঘণ্টায় নেওয়ার রেকর্ড ত্বরণ ভারী বস্তুকে দ্রুত ত্বরিত করার মৌলিক বাস্তবতা দেখায়।

৩.২. অতিপরিবাহী প্রযুক্তি ও বিতরণকৃত স্থাপত্য

StarRoad উল্টো স্থাপত্য ব্যবহার করে: প্রধান উত্তোলন ও স্থিতিকরণ ক্ষেত্র তৈরির অতিপরিবাহী চুম্বক শাটলে থাকে এবং তার ক্রায়োজেনিক ব্যবস্থায় শীতল হয়। সুড়ঙ্গ তুলনামূলক সরল ও সস্তা তামা বা অ্যালুমিনিয়ামের 'রেল' কুণ্ডলী থাকে, যা নিষ্ক্রিয় নির্দেশক এবং স্পন্দিত ত্বরণশক্তি পরিবহনের গৌণ বর্তনী হিসেবে কাজ করে। এতে সুড়ঙ্গের ব্যয় ও জটিলতা কয়েক মাত্রা কমে এবং প্রধান প্রযুক্তিগত জটিলতা পুনর্ব্যবহারযোগ্য শাটলে যায়, যেখানে কেন্দ্রীয়ভাবে রক্ষণাবেক্ষণ করা যায়।

৩.৩. স্পন্দিত শক্তি

পথজুড়ে বিতরণ করা সুপারক্যাপাসিটর ও ব্যাটারি স্টেশন ভূতাপীয় স্বয়ংক্রিয় তাপ-শক্তি ব্যবস্থার নেটওয়ার্ক থেকে চার্জ হয় এবং ত্বরণযন্ত্রের প্রয়োজনীয় অংশে গিগাওয়াট-স্তরের স্পন্দ সরবরাহ করে।

৩.৪. বায়ুশূন্যতা প্রযুক্তি

CERN-এর Large Hadron Collider, SpinLaunch এবং Hyperloop নির্বাত নলের অভিজ্ঞতা।

৩.৫. অতিধ্বনিক বায়ুগতিবিদ্যা ও তাপীয় সুরক্ষা

মহাকাশযান, চালনাযোগ্য পুনঃপ্রবেশ যান এবং SpaceX Starship-এর মতো প্রকল্প থেকে পাওয়া জ্ঞান। সক্রিয় শীতলীকরণ এবং দশা-পরিবর্তন তাপ সঞ্চায়ক।

৩.৬. পারমাণবিক শক্তি ব্যবস্থা

কক্ষপথে শাটলকে শক্তি দিতে রেডিওআইসোটোপ তাপবিদ্যুৎ জেনারেটরের পরবর্তী প্রজন্মের ছোট অনবোর্ড রিঅ্যাক্টর অথবা Helion Energy ব্যবস্থার মতো ভবিষ্যৎ সংযোজন মডিউল।

৩.৭. সুড়ঙ্গ নির্মাণ

আধুনিক সুড়ঙ্গ-খনন যন্ত্র, যা বছরে কয়েক দশ কিলোমিটার এগোতে পারে; একাধিক সুড়ঙ্গ সমান্তরালে খনন করা হয়।

৩.৮. স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপশক্তি ব্যবস্থা

প্রকল্পে পরিবর্তিত উন্নত ভূতাপীয় ব্যবস্থা (Enhanced Geothermal Systems, EGS) প্রযুক্তির ওপর নিজস্ব সমন্বিত গিগাওয়াট-শ্রেণির শক্তি ও জলবায়ু অবকাঠামো তৈরি হবে। কার্যদ্রব্য হিসেবে বাতাস থেকে সরাসরি সংগ্রহ (Direct Air Capture, DAC) করা অতিসংকটাবস্থার কার্বন ডাই-অক্সাইড (CO_2) ব্যবহৃত হয়। ব্যবস্থা তিনটি গুরুত্বপূর্ণ কাজ একত্র করে: ১) ত্বরণ-সুড়ঙ্গের তাপীয় স্থিতির জন্য ভূতাপীয় ক্ষেত্র সক্রিয়ভাবে নিয়ন্ত্রণ; ২) ভিত্তি-লোড বিদ্যুৎ উৎপাদন; ৩) বায়ুমণ্ডলীয় CO_2 দীর্ঘমেয়াদে আবদ্ধ রাখা।

৩.৯. অতিধ্বনি দহন

গেটওয়ের গ্যাস-গতীয় বাধা বায়ু-হাইড্রোজেন মিশ্রণে চলা বলয়াকার অতিপরাধ্বনিক জেট ইঞ্জিন ব্যবহার করে। অতিপরাধ্বনিক দহন সুড়ঙ্গের অক্ষ বরাবর বাইরে মুখ করা স্থিতিশীল শব্দকু আকৃতির গ্যাসপ্রবাহ সৃষ্টি করে। এটি বায়ুমণ্ডলীয় বায়ু সরিয়ে দেয় এবং শাটল অতিক্রমকালে ত্বরণযন্ত্রের নির্বাত রক্ষাকারী চাপ-ঢাল তৈরি করে।

৩.১০. প্রবেশপথের বদ্ধ জ্বালানি চক্র

গ্যাস-গতীয় বাধায় পরিচ্ছন্ন, নবায়নযোগ্য জ্বালানি ব্যবহৃত হয়। পানির তড়িৎ বিশ্লেষণে হাইড্রোজেন তৈরি হয়; ইঞ্জিন বায়ুমণ্ডলের বাতাসকে জারক হিসেবে নেয়। বাধা চালু হলে দহনের প্রধান ফল অতিউত্তপ্ত জলীয় বাষ্প। ফলে দূরবর্তী পাহাড়ি স্থানে বিপুল রাসায়নিক জ্বালানি পৌঁছানো ও মজুতের প্রয়োজন থাকে না, নির্ভরযোগ্যতা বাড়ে এবং পরিচালন ব্যয় কমে।

৩.১১. প্রযুক্তি যাচাইয়ের কৌশল

প্রকল্পের উন্নয়ন দুটি সমান্তরাল পথে চলে: গাণিতিক মডেলিং এবং গুরুত্বপূর্ণ সমাবেশের পূর্ণ-পরিসর পরীক্ষা। এতে মূল প্রকল্পের ঝুঁকি কমিয়ে ধারণার বাস্তবতা দ্রুত নিশ্চিত হয় এবং নির্ভুল প্রকৌশল তথ্য পাওয়া যায়।

8. StarRoad-এর উপাদান ও প্রযুক্তির ধাপভিত্তিক বিস্তারিত বিবরণ

8.১. ত্বরণ সুড়ঙ্গ ও তার অবকাঠামো

- **দৈর্ঘ্য:** প্রায় ২,০৫০ কিমি।
- **প্রস্থচ্ছেদ।** উপবৃত্তাকার ($\sim ১৭.৫ \times ১২.৫$ মি), শাটলের বায়ুগতীয় আকৃতি ও স্থিতিশীল চৌম্বকীয় উত্তোলনের জন্য অনুকূলিত।
- **সুড়ঙ্গের গভীরতা:** প্রায় ৮ কিমি পর্যন্ত। ভূতাত্ত্বিক ও তাপীয় অবস্থা অনুকূল হলে আরও গভীরে নেওয়া সম্ভব। ত্বরণ-সুড়ঙ্গের গ্রহণযোগ্য গভীরতা কেবল বিস্তারিত ভূতাত্ত্বিক অনুসন্ধানের পর নির্ধারণ করা যাবে—পথজুড়ে বোরহোল খনন, তাপমাত্রার প্রোফাইল তৈরি, শিলার চাপাবস্থা, ফাটল ও জলভূতত্ত্ব মূল্যায়ন করে। গভীর স্তরের তাপমাত্রা ও তাপপ্রবাহ যত কম হবে, আনুমানিক সর্বোচ্চ $২০০-২৫০^{\circ}\text{C}$, প্রকৌশলগতভাবে সম্ভব গভীরতার পরিসর তত বাড়বে এবং বক্রতার ব্যাসার্ধ ও সংযোগ-অংশসহ পথের জ্যামিতি অনুকূল করার স্বাধীনতা তত বেশি হবে। এতে লক্ষ্যগত গতি বজায় রেখেও সুড়ঙ্গে সর্বোচ্চ অতিভার ও গতিশীল চাপ কমানো যায়।
- **নির্মাণ: সমন্বিত।** শুরুর প্রায় ৩৩০ কিমি অংশটি ভূগর্ভস্থ অল্প-চালু সরল পথ, যা ত্বরণ সহজ করতে প্রবেশদ্বারের দিকে সোজা নেমে যায়। মূল অংশটি তাপীয় স্থিতি, শূন্যস্থান বিচ্ছিন্নতা ও নিরাপত্তার জন্য গভীরে স্থাপিত বা ভূগর্ভস্থ সুড়ঙ্গ।
- **পথের জ্যামিতি:** প্রায় ৩৩০ কিমির পর S-আকৃতির বাঁক।
 - **নিম্নমুখী বাঁক:** ব্যাসার্ধ প্রায় ৬,৩০০ কিমি; প্রয়োজনীয় কোণ তৈরির জন্য সুড়ঙ্গকে ধীরে গভীরে নিয়ে যায়।
 - **উর্ধ্বমুখী বাঁক:** ব্যাসার্ধ ২,৫০০-৩,৫০০ কিমি; সুড়ঙ্গকে দিগন্তের সঙ্গে প্রায় $৫-৬^{\circ}$ কোণে প্রবেশদ্বারে তোলে। ব্যাসার্ধ এমনভাবে নির্ধারিত যে অতিধ্বনিক গতিতে কেন্দ্রাভিমুখী ত্বরণ $4g$ অতিক্রম না করে।
- **শূন্যস্থান ব্যবস্থা:** খণ্ডিত। প্রায় ৫০ কিমির প্রতিটি খণ্ড নিজস্ব ভ্যাকুয়াম পাম্প, সেন্সর ও জরুরি ভালভসহ স্বয়ংসম্পূর্ণ।

4.1.1. ত্বরণ ব্যবস্থা

শাটলের ত্বরণ ও স্থিতি তৈরি হয় তার অনবোর্ড অতিপরিবাহী চুম্বক এবং সুড়ঙ্গে বসানো বিতরণকৃত রৈখিক তড়িৎচৌম্বক চালক বা কুণ্ডলীর পারস্পরিক ক্রিয়ায়। চালকগুলো তামা ও অ্যালুমিনিয়ামের মতো সাধারণ পরিবাহীর খণ্ডিত নিক্রিয় কুণ্ডলী; এগুলোর ক্রায়োজেনিক শীতলকরণ লাগে না।

- **সুড়ঙ্গের শুরুর অংশে, ০-৩৩০ কিমি, চালকগুলো প্রধানত পথের নিচে থাকে।** এগুলো উত্তোলন ও $4g$ প্রাথমিক ত্বরণের জন্য চৌম্বকক্ষেত্র তৈরি করে এবং সক্রিয়ভাবে মাধ্যাকর্ষণ সাম্য করে।
- **মাঝের অংশে, ৩৩০-২,০০০ কিমি, বিশেষত S-বাঁকে, চালকগুলো সুড়ঙ্গের পুরো পরিধি ঘিরে থাকে।** এগুলো সূক্ষ্ম ত্বরণ দেয়, অতিধ্বনিক গতিতে শাটলকে বলপ্রয়োগে কেন্দ্রে ধরে এবং বাঁকে গতিপথ স্থির রাখে। উচ্চ রেডিয়াল ত্বরণযুক্ত শেষ অংশের মেঝেতে কাঠামোগতভাবে অতিরিক্ত ও শক্তিশালী কুণ্ডলী-উপাদান ব্যবহৃত হয়। ৩৩০-২,০০০ কিমি অংশে ত্বরণ শুরুতে $4g$ থেকে ক্রমে শেষে $0g$ -তে নামে; পথের শেষে চূড়ান্ত গতি প্রায় ১১ কিমি/সেকেন্ড হয়।
- **শেষ অংশে, ২,০০০-২,০৫০ কিমি, শেষ ৫০ কিমি বায়ুমণ্ডলীয় প্রবেশদ্বার দিয়ে বের হওয়ার আগে স্থিতি ও কেন্দ্রীকরণের জন্য।** এখানে কোনো ত্বরণ হয় না।

স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপ-শক্তি ব্যবস্থার উপকেন্দ্র থেকে স্পন্দিত শক্তি শাটলের অবস্থানের সঙ্গে কঠোর সমলয়ে নির্দিষ্ট কুণ্ডলী- **খণ্ডে পাঠানো হয়।** এতে চলমান চৌম্বকক্ষেত্র তৈরি হয়, যা অনবোর্ড চুম্বকের ক্ষেত্রের সঙ্গে ক্রিয়া করে শাটলকে ত্বরিত করে। এই স্থাপত্য সুড়ঙ্গের জটিলতা কমিয়ে রক্ষণাবেক্ষণ সহজ করে এবং উচ্চপ্রযুক্তির উপাদান পুনর্ব্যবহারযোগ্য শাটলে স্থানান্তর করে।

4.1.2. স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপশক্তি ব্যবস্থা

তাপীয় স্থিতি, শক্তি-স্বাধীনতা ও দীর্ঘায়ু নিশ্চিত করতে প্রতিটি ত্বরণ-সুড়ঙ্গের সঙ্গে ছোট ব্যাসের সাতটি সেবা-সুড়ঙ্গ থাকে, যা সমন্বিত স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপ-শক্তি ব্যবস্থা গড়ে:

- **ছয়টি প্রধান সংগ্রাহক-শক্তি সুড়ঙ্গ, ব্যাস ২ মিটার।** ত্বরণ-সুড়ঙ্গের মেঝে থেকে ৩০ মিটার নিচে, অক্ষের মধ্যে সমান ৭ মিটার ব্যবধানে। জোড়ায় জোড়ায় বিপরীতমুখী চক্রে অতিশীতল $+5^{\circ}\text{C}$ অতিসংকটাবস্থার CO_2 প্রবাহিত

করে। এতে ত্বরণের পুরো প্রস্থচ্ছেদের নিচে ১৫ মিটারের বেশি পুরু অবিচ্ছিন্ন শীতল ফলক তৈরি হয় এবং তাপীয় সেতু সম্পূর্ণ দূর হয়।

- **একটি প্রযুক্তিগত সেবা-সুড়ঙ্গ , ব্যাস ৩ মিটার।** ত্বরণ-সুড়ঙ্গের একই স্তরে ৩ মিটার পাশে; চলাচল না থামিয়ে স্থায়ী পরীক্ষা ও মেরামতের সুযোগ দেয়। ভূতাপীয় সুড়ঙ্গগুলো সর্বোচ্চ ২৫ MPa অভ্যন্তরীণ চাপ, শিলার চাপ ও গতিশীল চাপ একসঙ্গে সহ্য করার উপযোগী। সাতটি সুড়ঙ্গই সম্পূর্ণ রোবটচালিত ক্ষুদ্র টানেল বোরিং মেশিনের (TBM) বহর খনন করে। ব্যবস্থাটি শক্তির অবকাঠামোকে পরিবহন থেকে ভৌত ও কার্যগতভাবে আলাদা করে, ফলে ব্যতিক্রমী নির্ভরযোগ্যতা ও মেরামতযোগ্যতা আসে।

4.1.3. স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় ব্যবস্থা শীতলীকরণ ব্যবস্থা

- **গভীর শীতলকরণ চক্র।** ত্বরণ-সুড়ঙ্গের নিচে ভূতাপীয় ব্যবস্থার সংগ্রাহক-শক্তি সুড়ঙ্গ দিয়ে CO₂-ভিত্তিক কার্যদ্রব্য ঘন উচ্চচাপ বা অতিসংকটাবস্থায় প্রবাহিত হয়। গভীর সংগ্রাহকে ঢোকার আগে স্বাভাবিক নিম্ন-তাপ অবস্থায় ঠান্ডা প্রবাহের লক্ষ্য প্রায় +5...+15°C। ভূতাপীয় তাপ নেওয়া ও গভীর অংশ পার হওয়ার পর গভীরতা, শিলার তাপপ্রবাহ ও উৎপাদন-অবস্থা অনুযায়ী CO₂ +100°C-এর বেশি গরম হতে পারে। চক্রটি ভূতাপীয় তাপ সরিয়ে মূল সুড়ঙ্গের নিচে শীতল অঞ্চল তৈরি করে এবং প্রায় ৫-৮ কিমি গভীরে পথ নিরাপদে নির্মাণ সম্ভব করে।
- **জলতাপীয় প্রধান খাল । StarRoad পথ ধরে সেবা- মহাসড়ক, বিদ্যুৎলাইন ও যোগাযোগের সমান্তরালে খালটি নির্মিত হয়।** এটি টার্মিনালগুলোকে একক বিতরণকৃত ভূপৃষ্ঠীয় তাপ-অপসারণ ব্যবস্থায় যুক্ত করে।
খালটি প্রায় ৫-৮ মিটার চওড়া ও ২-৩ মিটার গভীর। তলায় কয়েকটি স্বতন্ত্র উচ্চচাপের কুণ্ডলী-পাইপ থাকে, যা পাশের টার্মিনালের মধ্যে CO₂ বহন করে। পানি তাপীয় বাফার ও মধ্যবর্তী তাপবাহক।
টারবাইন, তাপবিনিময় বা সংকোচন নোডের পর CO₂ প্রায় +50...+80°C-তে কুণ্ডলীতে ঢোকে। প্রায় ৫০ কিমি টার্মিনাল-মধ্যবর্তী অংশে এটি পানিতে তাপ দিয়ে ঋতু, আর্দ্রতা, বৃষ্টির তীব্রতা, রাতের বিকিরণীয় শীতলতা ও খালের কাজ অনুযায়ী প্রায় +22...+35°C-তে ঠান্ডা হয়।
স্বাভাবিক অবস্থায় খালের পানি প্রায় +22...+32°C থাকে, গরম অংশে স্থানীয়ভাবে +35...+45°C হতে পারে। গরম প্রবাহ ঢোকার কাছে অল্প সময়ের জন্য +50...+80°C পর্যন্ত উঠতে পারে, যা কিছু জৈব সক্রিয়তা কমাতে পারে; পরিশোধন ছাড়া পানি পানযোগ্য হয় না।
খালটি ওপর থেকে হালকা নির্বাচনী পাত দিয়ে ঢাকা, যা সূর্যরশ্মি প্রতিফলিত করে এবং অবলোহিত পরিসরে তাপ বের হতে দেয়।
- **টার্মিনাল শীতলকরণ।** প্রতিটি টার্মিনালে কুলিং টাওয়ার, তাপবিনিময়ক, পাম্প, বুস্টার কমপ্রেসর, টার্বোএক্সপ্যান্ডার ও সংরক্ষিত চিলার থাকে। স্বাভাবিক অবস্থায় অধিকাংশ নিম্নমানের তাপ খালের মাধ্যমে নিষ্ক্রিয়ভাবে বের হয়।
কুলিং টাওয়ার ও টার্মিনালের তাপবিনিময়ক খালের পর CO₂-কে প্রায় +22...+35°C থেকে +15...+25°C-তে আনে। দরকারে সংরক্ষিত চিলার গভীর সংগ্রাহকে পাঠানোর আগে -5...+5°C-তে নামায়। চিলার মূল অবিচ্ছিন্ন পদ্ধতি নয়; সর্বোচ্চ চাপ, জরুরি বা মৌসুমি সংরক্ষণ।
- **বুস্টার সংকোচন ও টার্বোএক্সপ্যান্ডার।** CO₂ পরের টার্মিনালে ঠান্ডা কিন্তু উচ্চচাপে পৌঁছায়। এরপর টার্বোএক্সপ্যান্ডারে পাঠালে সংকোচনের কিছু শক্তি ফিরে আসে এবং প্রসারণে তাপমাত্রা আরও নেমে চাপ, প্রবাহ ও প্রয়োজনীয় দশা অনুযায়ী প্রায় -10...+5°C হয়।
এরপর প্রয়োজনীয় তাপমাত্রা, চাপ ও দশায় CO₂ ভূতাপীয় সংগ্রাহক সুড়ঙ্গে যায়। এই চক্র বিনামূল্যের শক্তির উৎস নয়: কমপ্রেসর কাজ যোগ করে, খাল সংকোচনের তাপ ছাড়ে এবং টার্বোএক্সপ্যান্ডার খরচের কেবল অংশ ফেরায়। সুফল হলো সক্রিয় হিমায়ন যন্ত্রে কম চাপ দিয়ে আরও ঠান্ডা প্রবাহ।
- **অতিরিক্ত ও দ্বিমুখিতা।** কুণ্ডলী-পাইপগুলো দ্বৈত ও দ্বিমুখী। একটি চক্র নষ্ট হলে প্রবাহ সংরক্ষিত পাইপ বা পাশের টার্মিনাল দিয়ে পুনর্বিন্যস্ত হয়। তাপীয় চাপ, জরুরি অবস্থা ও অংশের অবস্থানুযায়ী CO₂-এর দিক বদলানো যায়।
- **মেরামতযোগ্যতা ।** খালটি প্রায় প্রতি কিলোমিটারে প্রতিবন্ধক দিয়ে ভাগ করা। ক্ষতিতে অংশটি বিচ্ছিন্ন করে পাম্পে পানির স্তর ন্যূনতম প্রযুক্তিগত মাত্রায় নামানো বা আংশিক শুকানো হয়। চাপ ছাড়ার পর মেরামত দল বা রোবট পুরো পথ না থামিয়ে কুণ্ডলীতে পৌঁছায়। মেরামতের সময় সংরক্ষিত চক্র, উল্টো প্রবাহ, পাশের টার্মিনালে বাড়তি তাপবিনিময় ও সাময়িক চিলার দিয়ে শীতলকরণ চলে।

- **সীমিত পানি-ব্যবস্থাপনা।** খালটি গৌণ পানি-ব্যবস্থাপনার কাজ করতে পারে। পূর্ব থেকে পশ্চিমে স্থির ঢাল থাকলে ধীর মাধ্যাকর্ষণ প্রবাহ, অংশ ধোয়া ও নিয়ন্ত্রিত অতিরিক্ত পানি নিষ্কাশন সম্ভব।

রাতের নিরক্ষীয় বৃষ্টি জলসংগ্রহ, পলি-ট্যাংক, ফিল্টার ও অতিপ্রবাহ দিয়ে খাল ভরতে ব্যবহার করা যায়। পানি সরাসরি CO₂ ছোঁয় না; তাই স্থানীয় পরিশোধনের পর সীমিত সেচ, টার্মিনালের প্রযুক্তিগত পানি, অগ্নিনির্বাপণ মজুত ও সবুজ সুরক্ষা-বলয়ে ব্যবহার করা যায়।

এই কাজটি গৌণ: এমন পরিমাণেই পানি নেওয়া যাবে যাতে খালের মূল কাজ—CO₂ শীতলকরণ ও ভূতাপীয় ব্যবস্থার তাপীয় স্থিতি—ব্যাহত না হয়।

- **StarRoad- এর জন্য গুরুত্ব।** গভীর সংগ্রাহক, জলতাপীয় প্রধান খাল, টার্মিনাল শীতলক, কুলিং টাওয়ার, বুস্টার কমপ্রেসর, টার্বোএক্সপ্যান্ডার ও সংরক্ষিত চিলার একক বিতরণকৃত তাপ ব্যবস্থাপনা গড়ে। এতে স্থানীয় হিমায়ন যন্ত্রের ওপর নির্ভরতা কমে, ট্রাটি-সহনশীলতা বাড়ে, টার্মিনালের মধ্যে তাপপ্রবাহ পুনর্বণ্টন করা যায় এবং ত্বরণ-সুড়ঙ্গ গভীরে নেওয়া আরও বাস্তবসম্মত হয়।

ভূপৃষ্ঠীয় শীতলকরণ StarRoad-এর অর্থনৈতিক গুরুত্বও বাড়ায়: পথ ধরে টার্মিনাল, সেবা-সড়ক, শক্তি-নোড, জলখাল, শিল্পাঞ্চল ও সেচকৃত কৃষিভূমির রৈখিক বলয় গড়ে ওঠে।

4.1.4. স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় ব্যবস্থা-এর কৌশলগত গুরুত্ব

শক্তি সরবরাহ ও তাপীয় স্থিতির পাশাপাশি ব্যবস্থার মূল কাজ হলো প্রধান ত্বরণ-সুড়ঙ্গকে নিরাপদ ও সাশ্রয়ীভাবে অতিগভীরে, ৫-৮ কিমি বা বেশি, নির্মাণ সম্ভব করা। তাপক্ষেত্রের সক্রিয় নিয়ন্ত্রণ ও ভূতাপীয় প্রবাহ অপসারণ সেই তাপমাত্রা-সীমা দূর করে যা না হলে এই গভীরতা অসম্ভব হতো। এতে বড় বক্রতা-ব্যাসার্ধের অনুকূল S-আকৃতির পথ সম্ভব, যা ২,০৫০ কিমি পথে মাল ও কবুর গ্রহণযোগ্য প্রায় 4g অতিভার রেখে শাটলকে মসৃণভাবে তুলে দিগন্তের সঙ্গে প্রায় ৫-৬° কোণে বের করার জন্য দরকার। তাই স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপ-শক্তি ব্যবস্থা শুধু শক্তির নয়, StarRoad-এর পুরো ব্যালিস্টিক পথ অনুকূলনের প্রযুক্তিগত ভিত্তি। পুরো কমপ্লেক্স রোবটচালিত ক্ষুদ্র TBM বহর খনন করে।

4.1.5. লব্ধ পার্শ্বীয় প্রযুক্তিগত সুড়ঙ্গ ব্যবস্থা

নির্মাণ, বায়ু চলাচল, মেরামত ও সরিয়ে নেওয়ার জন্য পথজুড়ে ৫০ কিমি অন্তর ৪০টি ঢালু পরিবহন সুড়ঙ্গ তৈরি করা হয়। প্রতিটির ঢাল ৩০° এবং উপবৃত্তাকার প্রস্থচ্ছেদ প্রায় ১৭.৫ × ১২.৫ মি। মূল সুড়ঙ্গের একই খননযন্ত্র দিয়ে এগুলো খনন করা হয় এবং পৃষ্ঠকে ৮ কিমি পর্যন্ত গভীরতার মূল করিডরের সঙ্গে যুক্ত করে।

- **সরবরাহব্যবস্থা।** জরুরি থামায় (Alarm-2) কর্মী ও কবুর জন্য স্বতন্ত্র উদ্ধারপথ দেয়। উল্লম্ব শ্যাফটের বদলে ঢালু সুড়ঙ্গে স্বচালিত যান ব্যবহার করে এক যাত্রায় কয়েক ডজন মানুষ সরানো যায়।
- **নিরাপত্তা।** জরুরি থামায় (Alarm-2) কর্মী ও কবুর জন্য দ্বিতীয় স্বতন্ত্র উদ্ধারপথ দেয়।
- **সম্প্রসারণ।** ঢালু সুড়ঙ্গ ভবিষ্যৎ সমান্তরাল StarRoad লাইন সংযোগের ভিত্তি। এগুলো থেকে নতুন ত্বরণ-সুড়ঙ্গে অনুভূমিক শাখা খনন করা যায়; প্রবেশপথের নেটওয়ার্ক ক্রমবর্ধমান পরিবহন কাঠামো হয়।
- **ভূতাপীয় ব্যবস্থার সঙ্গে সমন্বয়।** প্রতিটি ঢালু সুড়ঙ্গের নিচে আরও ১০-২০ মিটার গভীরে সংগ্রাহক সুড়ঙ্গ খনন করা হয়, যা নির্মাণের সময় শিলা আগাম জমিয়ে স্থির করে এবং পরে শক্তি উৎপাদন করে।
- **ভূপৃষ্ঠীয় টার্মিনাল কমপ্লেক্স।** প্রতিটি ঢালু সুড়ঙ্গ বহুকার্যকর টার্মিনালে শেষ হয়। ৪০টি টার্মিনালের প্রতিটি স্বতন্ত্র নোড, যেখানে আছে:

- সুড়ঙ্গের বায়ু বজায় রাখা ও ব্যবহৃত বাতাস সরানোর বায়ুচলাচল ও গ্যাস-পরিশোধন কমপ্লেক্স।
- মডিউল, খনিত মাটি ও নির্মাণসামগ্রী মজুত, স্থানান্তর ও সাময়িক রাখার স্থানসহ নির্মাণঘাট।
- পালাকর্মীদের জন্য প্রশাসনিক ও সুবিধা ভবন—নিয়ন্ত্রণকক্ষ, বিশ্রামকক্ষ, কর্মশালা ও গুদাম।
- গভীর সংগ্রাহক সুড়ঙ্গের তাপবাহক ব্যবহার ও নিয়ন্ত্রণকারী, সাধারণ ভূতাপীয় নেটওয়ার্কে যুক্ত বিদ্যুৎকেন্দ্র ও শীতলকরণ ইউনিট।
- CO₂ সংগ্রহ ও প্রক্রিয়াকরণ কেন্দ্র (DAC)। এটি বাতাস থেকে সরাসরি কার্বন ডাই-অক্সাইড ধরে এবং ভূতাপীয় বন্ধ চক্র সম্পন্ন করে: সংগৃহীত CO₂ তরল, পরিশোধিত ও তাপবাহক হিসেবে গভীর সংগ্রাহক সুড়ঙ্গে পাঠানো হয়।
- বাহ্যিক বিদ্যুৎগ্রিড ও যোগাযোগের সংযোগবিন্দু—সংরক্ষিত বিদ্যুৎ ও ব্রডব্যান্ড চ্যানেল।

- **আঞ্চলিক** পরিবহন নেটওয়ার্কে যুক্ত সড়ক বা রেল শাখা।
- **ভূপৃষ্ঠীয়** উদ্ধারকেন্দ্র, যেখানে জরুরি চিকিৎসা কেন্দ্র ও হেলিপ্যাড আছে।

- **আইনি ও পরিবেশগত নমনীয়তা।** ঢালু পরিষেবা সুড়ঙ্গের কারণে ভূপৃষ্ঠের টার্মিনাল জাতীয় উদ্যান, সংরক্ষিত এলাকা ও জলাধার অববাহিকার বাইরে রাখা যায়—StarRoad গভীর নিচ দিয়ে গেলেও। এতে পার্কের সীমানার ভেতরে অবকাঠামো না বসিয়ে সংরক্ষিত এলাকার নিচে রুট নেওয়ার প্রধান আইনি বাধা দূর হয়। প্রতিটি টার্মিনাল কাছের অসংরক্ষিত স্থানে তৈরি করে ঢালু শ্যাফটে যুক্ত করা হয়; অনুমোদন সহজ হয়, পরিবেশগত চাপ কমে এবং সংরক্ষিত বাস্তুতন্ত্রে সরাসরি প্রভাব থাকে না।

4.1.6. বিদ্যুৎ সরবরাহ ও শক্তি সঞ্চয়

StarRoad ত্বরকের বিদ্যুৎ সরবরাহ তিন-স্তরের নেটওয়ার্ক, যা দেয়:

- নিশ্চিত অতিরেক—একটি উপাদান নষ্ট হলে চলাচল থামে না;
- অভিযোজিত শক্তি-নিঃসরণ—শুরুতে সেকেন্ড থেকে শেষে মাইক্রোসেকেন্ড;
- বিদ্যুৎ তারের ন্যূনতম দৈর্ঘ্য—ক্ষয় ও আবেশ কমে।

- **স্থাপত্যের স্তর**

স্তর ০: প্রাথমিক সঞ্চয়ক—টার্মিনাল

- ৪০টি টার্মিনাল; প্রতিটিতে মাধ্যাকর্ষণ সঞ্চয়ক, পাম্পড জলবিদ্যুৎ সঞ্চয়—খালের ক্ষুদ্র জলবিদ্যুৎ কেন্দ্র—ও লিথিয়াম-আয়ন ব্যাটারি (BESS) আছে।
- প্রতি টার্মিনালে মোট ধারণক্ষমতা প্রায় 5–9 GWh; পুরো পথে প্রায় 360 GWh।
- নিঃসরণ: প্রযুক্তিগত সুড়ঙ্গে প্রধান তার দিয়ে সর্বোচ্চ 100 kV উচ্চ-ভোল্টেজ DC।

স্তর ১: খণ্ড নিয়ন্ত্রক—৫০ কিমি খণ্ড

- পথটি ৪১টি ৫০ কিমি খণ্ডে বিভক্ত; শেষটি প্রবেশদ্বার পর্যন্ত ৫০ কিমি।
- প্রতিটি খণ্ডের মূল বণ্টন নিয়ন্ত্রক দুই পাশের টার্মিনাল থেকে শক্তি নেয়—পারস্পরিক অতিরেক।
- খণ্ড নিয়ন্ত্রক এক কিলোমিটার করে শক্তি-ব্লকে শক্তি বণ্টন ও কাজ সমলয় করে।

স্তর ২: এক-কিলোমিটার শক্তি ব্লক। প্রতিটি ব্লকের স্থানীয় নিয়ন্ত্রক:

- খণ্ড নিয়ন্ত্রক থেকে শক্তি নেয়;
- মূল সুড়ঙ্গের দেয়ালের নিচে থাকা বাফার লিথিয়াম-আয়ন ব্যাটারি নিয়ন্ত্রণ করে;
- দেয়ালের পেছনের বিশেষ খোপে রাখা ফ্লাইহুইল ও আয়নিষ্টর বা সুপারক্যাপাসিটরের মাধ্যমে যুক্ত পরিবর্তনযোগ্য কুণ্ডলী-সেট নিয়ন্ত্রণ করে।

খণ্ড নিয়ন্ত্রক থেকে প্রতিটি কিলোমিটার ব্লকে দুটি স্বাধীন চ্যানেল অতিরেক দেয়।

- **তারপথের স্থাপত্য**

- **প্রধান তার, স্তর ০→১:** মূল সুড়ঙ্গ থেকে ৩ মিটার দূরে সমান্তরাল চলা ৩-মিটার প্রযুক্তিগত সেবা-সুড়ঙ্গে বসানো।
- **পথে বণ্টন:** প্রতিটি টার্মিনাল থেকে তার দুই দিকে ৫০ কিমি, মোট ১০০ কিমি, গিয়ে পাশের টার্মিনালের অঞ্চল আচ্ছাদিত করে। ফলে প্রতিটি খণ্ড অন্তত দুই পাশের টার্মিনাল থেকে শক্তি পায় এবং ১০০% অতিরেক হয়।
- **মূল সুড়ঙ্গে প্রবেশ:** প্রতি ১ কিমিতে সিল করা পারাপার দিয়ে তার প্রযুক্তিগত সুড়ঙ্গ থেকে মূল সুড়ঙ্গে এসে কিলোমিটার ব্লক নিয়ন্ত্রকে যুক্ত হয়।
- **ব্লকের ভেতর বণ্টন:** নিয়ন্ত্রকের পর শক্তি দুটি সমান্তরাল পথে ভাগ হয়:

পথ A: বাফার লিথিয়াম-আয়ন ব্যাটারিতে—প্রতি ব্লক প্রায় 0.5–1 GWh, সেকেন্ডমাত্রার শীর্ষ সমান করতে।

পথ B: সুড়ঙ্গের দেয়ালের পেছনে বসানো ফ্লাইহুইল বা জড়তাময় সঞ্চয়ক এবং আয়নিস্টর বা সুপারক্যাপাসিটরের মাধ্যমে পরিবর্তনযোগ্য কুণ্ডলী-সেটে।

- **নির্গমন হারের তিন-অঞ্চল অভিযোজন।** শাটলের ত্বরণ প্রোফাইল এমনভাবে অনুকূলিত যে প্রতি কুণ্ডলী গুচ্ছে সর্বোচ্চ শক্তি শুরুতে থাকে, যেখানে অতিক্ষুদ্র স্পন্দ দরকার নেই, এবং পথের শেষের দিকে কমে। এতে তিন অঞ্চলে ভিন্ন সঞ্চয় ও সুইচিং প্রযুক্তি ব্যবহার করা যায়:

অঞ্চল	পথের অংশ	নিঃসরণের ধরন	সঞ্চয়ক/সুইচিংয়ের ধরন	কারণ
অঞ্চল I— কম গতি	০–২০০ কিমি	সেকেন্ড থেকে মিলিসেকেন্ড	লিথিয়াম-আয়ন ব্যাটারি + মানসম্মত IGBT ইনভার্টার	শাটল ধীরে চলে; এক কিলোমিটার পার হতে ০.১ সেকেন্ডের বেশি লাগে। বাফার ছাড়া BESS থেকে চালানো সম্ভব।
অঞ্চল II— মাঝারি গতি	২০০–১,০০০ কিমি	মিলিসেকেন্ড থেকে মাইক্রোসেকেন্ড	বাফার লিথিয়াম-আয়ন ব্যাটারি + জড়তাময় ফ্লাইহুইল + SiC ইনভার্টার	শাটলের গতি বাড়ে; দ্রুত সুইচিং দরকার, কিন্তু যান্ত্রিক ফ্লাইহুইল তখনও গ্রহণযোগ্য।
অঞ্চল III— উচ্চ গতি	১,০০০– ২,০০০ কিমি	মাইক্রোসেকেন্ড স্পন্দন	আয়নিস্টর বা সুপারক্যাপাসিটর + দ্রুত থাইরিস্টর সুইচ (GTO/IGCT)	এক কিলোমিটার পার হওয়ার সময় ০.০৯ সেকেন্ডে নামে। কেবল ন্যানোসেকেন্ড প্রতিক্রিয়ার সুপারক্যাপাসিটর ও আয়নিস্টর স্পন্দন স্থির করতে পারে।

গুরুত্বপূর্ণ: অঞ্চল III-তে প্রতি কিলোমিটার শক্তি অঞ্চল I-এর চেয়ে কম লাগে, কারণ ত্বরণ কমে। তাই নিঃসরণের গতির কঠোর চাহিদা সত্ত্বেও উপাদানে চাপ কম।

○ অতিরেক ও জরুরি সহনশীলতা

- **নিয়ন্ত্রকের দ্বৈততা:** প্রতিটি খণ্ড ও কিলোমিটার নিয়ন্ত্রকে সক্রিয় সংরক্ষণ থাকে—স্বতন্ত্র শক্তিসহ দুটি অভিন্ন বোর্ড।
- **পারস্পরিক বিদ্যুৎ:** প্রতিটি কিলোমিটার ব্লক নিজের খণ্ড নিয়ন্ত্রক ছাড়াও প্রযুক্তিগত সুড়ঙ্গের সংরক্ষিত তার দিয়ে পাশের নিয়ন্ত্রক থেকে শক্তি নিতে পারে।
- **স্থানীয় কুণ্ডলী অতিরেক:** প্রতিটি কিলোমিটার ব্লকে পর্যায়ক্রমে চালানো তিনটি স্বতন্ত্র কুণ্ডলী-সেট। একটি ক্ষতিগ্রস্ত হলে বাকি দুটি কম দক্ষতায় কিন্তু না থেমে ত্বরণ চালায়।
- **জরুরি বিচ্ছিন্নতা:** শর্ট সার্কিট বা অতিরিক্ত তাপ শনাক্ত হলে কিলোমিটার নিয়ন্ত্রক নিজের ব্লকের শক্তি বন্ধ ও আন্তঃখণ্ড প্রতিবন্ধকে বিচ্ছিন্ন করে; পাশের ব্লক প্রভাবিত হয় না।

○ উপাদানগত বাস্তবায়ন ও উপসংহার

উপাদান	অবস্থান	কাজ
প্রাথমিক সঞ্চয়ক	ভূপৃষ্ঠে—টার্মিনালে	দীর্ঘমেয়াদি শক্তি সঞ্চয়—360 GWh।
প্রধান তার	প্রযুক্তিগত সুড়ঙ্গ—৩ মিটার	অতিরেকসহ টার্মিনাল থেকে খণ্ডে শক্তি পরিবহন।
খণ্ড নিয়ন্ত্রক	মূল সুড়ঙ্গের খোপে—প্রতি ৫০ কিমিতে	১০টি কিলোমিটার ব্লকে শক্তি বণ্টন ও সমলয়।
বাফার লিথিয়াম-আয়ন ব্যাটারি	মূল সুড়ঙ্গের দেয়ালের নিচে	অঞ্চল I-II-তে সেকেন্ডমাত্রার শীর্ষ সমান করা।
ফ্লাইহুইল	সুড়ঙ্গের দেয়ালের পেছনে—অঞ্চল II	মিলিসেকেন্ড স্পন্দনের বাফার।
আয়নিস্টর বা সুপারক্যাপাসিটর	সুড়ঙ্গের দেয়ালের পেছনে—অঞ্চল III	মাইক্রোসেকেন্ড-স্তরের স্থিতিশীলতা এবং ভোল্টেজ পতনের ক্ষতিপূরণ।
স্থানীয় কিলোমিটার নিয়ন্ত্রক	প্রতি ১ কিমির খোপে	কুণ্ডলী সুইচিং, অবস্থা নজরদারি ও বাফার নিয়ন্ত্রণ।
ত্বরকের কুণ্ডলী	সুড়ঙ্গের ভেতরের পৃষ্ঠ	শাটল ত্বরিত করতে চলমান চৌম্বকক্ষেত্র তৈরি।

○ বিদ্যুৎ সরবরাহ স্থাপত্যের সুবিধা

- **মসৃণ চাপ বণ্টন।** সুড়ঙ্গের পুরো দৈর্ঘ্যে একই সঙ্গে সর্বোচ্চ ক্ষমতা লাগে না: শুরুতে স্পন্দন ধীর, শেষে ছোট কিন্তু কম ক্ষমতার।
- **সব স্তরে অতিরেক।** একটি টার্মিনাল, নিয়ন্ত্রক বা পুরো ৫০ কিমি খণ্ড নষ্ট হলেও ব্যবস্থা থামে না—পাশের টার্মিনাল ও খণ্ড শক্তির ঘাটতি পূরণ করে।

- **সম্প্রসারণে নমনীয়তা**। নতুন সমান্তরাল StarRoad লাইন যোগ করতে শক্তি ব্যবস্থা আবার বানাতে হয় না; বর্তমান প্রযুক্তিগত সুড়ঙ্গে অতিরিক্ত প্রধান তার বসালেই হয়।
- **ব্যয় অনুকূলন**। দামি আয়নিস্টের ও ফ্লাইইল শুল্ক সত্যিই যেখানে দরকার—শেষ অংশে—ব্যবহৃত; শুরুতে সস্তা লিথিয়াম-আয়ন ব্যাটারি চলে।

৪.২. বায়ুমণ্ডলীয় গেটওয়ে (উচ্চভূমির টার্মিনাল)

এতে ‘শেষ মাইল’ সমস্যার সমাধান হয়।

৪.২.১. অবস্থান ও নির্মাণ

প্রবেশদ্বার কমপ্লেক্সটি গণতান্ত্রিক কঙ্গে প্রজাতন্ত্রের মোহি পর্বতের শীর্ষ মালভূমিতে, প্রায় ৩,৪০০ মিটার উচ্চতায়। ভবিষ্যৎ সম্প্রসারণের জন্য ১৬ কিমি দক্ষিণে বিস্তৃত দক্ষিণ মালভূমি সংরক্ষিত, যেখানে কয়েক ডজন সমান্তরাল প্রবেশদ্বার বসতে পারে। এটি মূল যান্ত্রিক প্রতিবন্ধক ও গ্যাস-গতিশীল বাধা তৈরির ব্যবস্থাসহ বিশাল স্থাপনা। কার্যত এটি তিনটি বলয়াকার নোজলযুক্ত ভূমিভিত্তিক স্থির জেট ইঞ্জিন, আকাশের দিকে কাত করা; কোনো বস্তুকে ত্বরিত করতে নয়, বরং বাতাস সরিয়ে শাটলের বায়ুমণ্ডলে প্রবেশের সময় বাফার গড়তে।

৪.২.২. গ্যাস-গতিশীল বাধা

মূল কার্যকর উপাদান। শাটল কাছে এলে কয়েক সেকেন্ড আগে সুড়ঙ্গের অক্ষ বরাবর বাইরে-মুখী শঙ্কু আকৃতির পরাধ্বনিক গ্যাসপ্রবাহ তৈরি শুরু হয়।

- **উৎস ও নির্মাণ**। গ্যাস-গতিশীল বাধা তৈরি করে তিনটি স্বতন্ত্র, সমকেন্দ্রিক বলয়াকার জেট ইঞ্জিন বা বেল্ট, অথবা একই তিন-বেল্ট বিন্যাসের সমজাতীয় অতিধ্বনিক র‍্যামজেট। এগুলো প্রবেশদ্বারের মুখ ঘিরে বসানো এবং বায়ু-হাইড্রোজেন জ্বালানি-মিশ্রণে চলে; হাইড্রোজেন স্থানেই তড়িৎবিশ্লেষণে উৎপাদিত হয়। তিনগুণ অতিরিক্ত ক্রাউ-সহনশীলতা দেয়: কার্যকর বাধার জন্য যেকোনো দুটি বেল্ট চালু থাকলেই যথেষ্ট, তাই তিনটির একটি নষ্ট হলেও ব্যবস্থা সচল থাকে। প্রতিটি বেল্টের নিজস্ব জ্বালানি সরবরাহ, নিয়ন্ত্রণ ও প্রজ্বলন ব্যবস্থা আছে। বেল্টগুলো প্রবেশদ্বারের বাইরের দিকে ছোট থেকে বড়টির দিকে ধাপে ধাপে পিছিয়ে একটির ওপর আরেকটি থাকে; যান্ত্রিক প্রতিবন্ধকটি বেল্ট-সারির পেছনে প্রবেশদ্বারের ভেতরে। ফলে আগে যান্ত্রিক প্রতিবন্ধক না খুলেও বেল্ট চালু করা যায়।

- **মূল কাজ।**

১) **শাটল যাওয়ার সময় সুড়ঙ্গের শূন্যস্থান রক্ষায়** বাইরে-মুখী চাপ তৈরি করা;

২) **প্রবেশদ্বারের সামনের নির্গমন অঞ্চলে বায়ুমণ্ডলীয়** বাতাস আগে সরানো ও গরম করা, যাতে সুড়ঙ্গের শূন্যস্থান ও বায়ুমণ্ডলের সীমানায় চাপ-ঢাল এবং দুই মাধ্যমের মধ্যে ক্রমিক রূপান্তর তৈরি হয়।

গ্যাস-গতিশীল বাধা শাটলের বায়ুগতীয় ঢাল নয় এবং তাকে বায়ুমণ্ডল থেকে আড়াল করে না। এর কাজ মাধ্যম বদলের মুহূর্তটি সময়ে ছড়িয়ে দেওয়া—ঠান্ডা স্থির বাতাসে সংস্পর্শের প্রায় তাৎক্ষণিক, মাইক্রোসেকেন্ডমাত্রার আঘাতকে একই দিকে চলা উত্তপ্ত প্রবাহে সংস্পর্শের বিতরণকৃত মিলিসেকেন্ড চাপের রূপ দেওয়া। এতে মোট বায়ুগতীয় বল কমে না, কিন্তু ঝাঁকুনি (jerk) ও উচ্চ-কম্পাঙ্কের চাপ তীব্রভাবে কমে; স্থানীয় ভাঙন ও কাঠামোর তাপীয় আঘাতের ঝুঁকি হ্রাস পায়।

- **প্রবাহের আকৃতি:** সুড়ঙ্গ ও শাটলের প্রস্থচ্ছেদের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ উপবৃত্তাকার শঙ্কু। এটি কয়েক দশক থেকে কয়েক শত মিটার দীর্ঘ এবং প্রবেশদ্বারের জেট-বেল্টের তিন সারি বলয়াকার নোজল থেকে বাইরে বের হয়।

বায়ুমণ্ডলীয় প্রবেশদ্বারের গ্যাস-গতিশীল বাধার জন্য নিখুঁত জ্যামিতিক, স্থির বা কঠোর অক্ষ-প্রতিসম শঙ্কু দরকার নেই। এর কাজ স্বভাবতই গতিশীল; প্রবাহের আকৃতি, ঘনত্ব ও গতির সময়িক ও স্থানিক ওঠানামা গ্রহণযোগ্য।

প্রবেশদ্বার কার্যকর থাকার একমাত্র কঠোর ও নির্ণায়ক শর্ত হলো শাটল বের হওয়ার পুরো সময় চাপ ও ভরবেগের ধনাত্মক, বাইরে-মুখী ঢাল বজায় রাখা, যাতে বায়ুমণ্ডলীয় বাতাস সুড়ঙ্গে একেবারেই ঢুকতে না পারে। একই সঙ্গে নির্গমন অঞ্চলের বাতাসকে আগে থেকেই গ্যাস-গতিশীল ও তাপীয়ভাবে প্রস্তুত করতে হবে; এতে ব্যবস্থার নির্ভরযোগ্যতা ও বাস্তবায়নযোগ্যতা অনেক বাড়ে।

তাই প্রবাহের আকৃতি লক্ষ্যমান নয়, অভিযোজিত পরামিতি। কঠোর জ্যামিতির বদলে চাপ, ভরপ্রবাহ ও ভরবেগের সমন্বিত বৈশিষ্ট্য ধরে এটি তাৎক্ষণিকভাবে অনুকূল করা হয়।

- **সম্প্রসারণযোগ্যতা ও পরীক্ষা।** হাজার কিলোমিটারের ত্বরকের তুলনায় প্রবেশদ্বারের নকশা মডুলার ও সহজে সম্প্রসারণযোগ্য। স্থিতিশীল পরাধ্বনিক গ্যাস-গতিশীল শঙ্কু তৈরি, সমলয়করণ ও জেট-বেন্ট চালনার মতো মূল প্রযুক্তি ১:৫ বা ১:১০ মাপের পূর্ণ-কার্যকর বাস্তব পরীক্ষামঞ্চে সম্পূর্ণ যাচাই করা যায়। এতে মূল পথের পূর্ণমাত্রার নির্মাণ শুরুর আগেই প্রধান প্রযুক্তিগত ঝুঁকি দূর করা সম্ভব।

4.2.3. নিরাপত্তা ব্যবস্থা

হাইড্রোজেন ব্যবহারে বিস্ফোরণ ও অগ্নিনিরাপত্তার কঠোর চাহিদা থাকে। তাই প্রবেশদ্বারের অবকাঠামোতে হাইড্রোজেন লিক শনাক্তের দ্বৈত ব্যবস্থা, নাইট্রোজেনে পাইপের নিষ্ক্রিয় ফ্লাশিং, বিস্ফোরণ-সুরক্ষিত যন্ত্র, তড়িৎবিশ্লেষণ ইউনিট, মজুত ও ইঞ্জিন-বেন্টের ভৌত বিচ্ছিন্নতা এবং সম্ভাব্য নির্গমনকে কর্মী ও গুরুত্বপূর্ণ অবকাঠামো থেকে দূরে নিরাপদে বায়ুমণ্ডলে পাঠানোর নির্দেশিত বায়ুনালি থাকে।

8.৩. শাটল (AstroLiner)

4.3.1. মাত্রা ও উৎক্ষেপণ ভর

দৈর্ঘ্য প্রায় ১৫০ মিটার, উপবৃত্তাকার প্রস্থচ্ছেদ প্রায় ১০×১৫ মিটার। আকৃতি অতিধ্বনিক কীলকের মতো, বায়ুমণ্ডল ভেদ করার সময় প্রতিরোধ ও তাপীয় চাপ কমানোর উপযোগী।

- **অনুকূল উৎক্ষেপণ ভর: প্রায় ১৫,০০০ টন।**

১৫,০০০ টনের শাটল হলো ভৌত সীমা ও বাস্তবায়নের সামর্থ্যের মাঝামাঝি অবস্থানে থাকা প্রকৌশল ও অর্থনৈতিক সর্বোত্তম মানের ফল।

মানদণ্ড	নিম্ন সীমা (< ৮,০০০–১০,০০০ টন)	অনুকূল মান (১৫,০০০ টন)	উর্ধ্ব সীমা (> ২০,০০০–২৫,০০০ টন)
বায়ুগতিবিদ্যা ও অতিভার	বায়ুমণ্ডল প্রাধান্য পায়। টান বল $F_d = \rho \cdot A \cdot v^2$ থেকে উচ্চ অতিভার $a = F_d/m$ তৈরি হয়, যার জন্য জটিল সক্রিয় স্থিতিকরণ লাগে এবং তাপীয় চাপ শীর্ষে পৌঁছে।	জড়তা প্রাধান্য পায়। বায়ুপ্রতিরোধ শুরুতে অল্প সময়, সর্বোচ্চ ৫ সেকেন্ড, প্রায় 3–6g অতিভার তৈরি করে; ফলে সহজতর আঘাত-শোষণ ও তাপরক্ষা ব্যবস্থা ব্যবহার করা যায়।	অতিভার খুব সামান্য কমে, কিন্তু অন্য কারণগুলো সুবিধা নষ্ট করে দেয়।
তাপীয় অবস্থা	কম তাপধারণ ক্ষমতা। কম ভর m -এর কারণে তাপমাত্রা $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$ দ্রুত বাড়ে, ফলে চরম সক্রিয় শীতলকরণ দরকার হয়।	উচ্চ তাপীয় জড়তা। ভারী কাঠামো অল্প সময়ের বায়ুমণ্ডল ভেদের সর্বোচ্চ তাপ শোষণ ও ছড়িয়ে দেয়; নিষ্ক্রিয় ও সক্রিয় তাপরক্ষার সমন্বয় সম্ভব হয়।	তাপধারণ ক্ষমতা বাড়ে, কিন্তু ভারী কাঠামো থেকে তাপ অপসারণ আলাদা সমস্যা হয়ে দাঁড়ায়।
উৎক্ষেপণ শক্তি	প্রয়োজনীয় শক্তি $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ গ্রহণযোগ্য, কিন্তু অসুবিধাগুলো পুষিয়ে দেয় না।	যৌক্তিক ভারসাম্য। ১১ কিমি/সেকেন্ড পর্যন্ত ত্বরণে প্রায় 9×10^{14} জুল, অর্থাৎ প্রায় 252 GWh লাগে; এটি বিতরণকৃত স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপ-শক্তি ব্যবস্থা ও সঞ্চয়কের সামর্থ্যের মধ্যে।	শক্তি ব্যয় সরলরৈখিকভাবে বাড়ে, কিন্তু শক্তি ও সঞ্চয়ক্ষমতা অসামঞ্জস্যপূর্ণ হারে বাড়াতে হয়; অর্থনৈতিকভাবে তা অদক্ষ।
কাঠামো ও সরবরাহব্যবস্থা	বাস্তবায়নযোগ্য, কিন্তু ‘জড়তাময় রাম’-এর মূল সুবিধা দেয় না।	বর্তমান প্রযুক্তির সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ। মাত্রা ও ভর আধুনিক জাহাজ নির্মাণের ডক, ঢালাই পদ্ধতি ও পরিবহন ক্ষমতার মধ্যে।	কাঠামো দৃঢ়তা হারায়; নিজস্ব কম্পন, সংযোজন ও উৎক্ষেপণস্থলে পরিবহনের সমস্যা দেখা দেয়। ব্যয় সরলরেখার চেয়ে দ্রুত বাড়ে।
StarRoad-এর দর্শন	এটি বায়ুমণ্ডলের কাছে দুর্বল ‘হালকা যান’-এর ধারণাতেই থেকে যায়।	এটি ‘জড়তাময় রাম’-এর ধারণা বাস্তবায়ন করে: বায়ুমণ্ডল কোনো বাধা নয়, বরং অল্প সময়ের বিঘ্ন, যা ভর ও দৃঢ়তা দিয়ে অতিক্রম করা হয়।	এটি শিল্পের সাধ্যের বাইরে কাজ হয়ে যায় এবং বৃহৎ পরিসরের সাশ্রয় নষ্ট করে।

- **ভৌতভাবে** এটি প্রায় ১০,০০০ টনের সেই সীমার ওপরে, যার পর জড়তা বায়ুগতীয় প্রভাবের ওপর প্রাধান্য শুরু করে।
- **শক্তির দিক** থেকে এটি অবকাঠামোর চাহিদা সূচকীয়ভাবে বাড়ায় না।
- **প্রযুক্তির দিক** থেকে এটি জাহাজ নির্মাণ ও ভারী প্রকৌশলের মতো সম্প্রসারণযোগ্য শিল্পচর্চার মধ্যে থাকে।
- **অর্থনীতির দিক** থেকে এটি বৃহৎ পরিসরে উৎক্ষেপণ-ব্যয় কমা ও মূলধনী ব্যয় সীমিত রাখার মধ্যে ভারসাম্য করে।

অতএব এই পরামিতি গণিতভিত্তিক **অনুকূল মান**, যা **StarRoad** ধারণাকে ভৌতভাবে বাস্তবায়নযোগ্য ও অর্থনৈতিকভাবে যুক্তিসংগত করে।

4.3.2. বিন্যাস ও ব্যবস্থা

পুরো অভ্যন্তরীণ স্থাপত্যটি বহুস্তরীয় অনুদৈর্ঘ্য কাঠামো, যেখানে দেহের উচ্চতা অনুসারে কাজ ভাগ করা।

- **দেহের নিচের ও পেছনের** অংশ পুরোপুরি শক্তি ও ক্ষমতা ব্যবস্থার জন্য—অনবোর্ড রিঅ্যাক্টর, তাপবিনিময়ক, সক্রিয় শীতলকরণ চক্র, ক্ষমতা রূপান্তরক, শক্তি সঞ্চয়ক, শীতলক প্রবাহপথ ও সামুদ্রিক চালনার উপাদান। এতে শাটলের ভরকেন্দ্র নিচে নামে, অতিধ্বনিক উড্ডয়ন, গ্লাইড ও জল-অবতরণে স্থিতি বাড়ে এবং ওপরের অংশের তাপ ও বিকিরণ সুরক্ষা সহজ হয়।
- **অতিপরিবাহী উত্তোলন ও স্থিতিকরণ ব্যবস্থা** শাটলের দুই পাশ এবং আংশিকভাবে তলায় সংযুক্ত। মডিউলগুলো বাইরের আবরণ ও তাপরক্ষা স্তরের ঠিক পেছনে বসানো, যাতে চৌম্বকক্ষেত্র ও সুড়ঙ্গের নিষ্ক্রিয় কুণ্ডলীর ফাঁক কম থাকে। চুম্বকগুলো থাকে:
 - দেহের পুরো দৈর্ঘ্যজুড়ে দুই পাশে, সরে-খোলা ওপরের দরজার রেখা পর্যন্ত ওপর ও মধ্য অঞ্চলসহ;
 - তলার মধ্য ও পেছনের অংশে;
 - মূল পাখা বের হওয়ার জায়গা ও যান্ত্রিক খোপ বাদ দিয়ে।

এই বিন্যাস সমান চৌম্বকক্ষেত্র, অতিধ্বনিক গতিতে উচ্চ স্থিতি এবং স্থানীয় ক্ষতিতে ত্রুটি-সহনশীলতা দেয়।

- **দেহের মধ্যাংশ** ভাঁজযোগ্য পাখার খোপ ও তাদের ভারবহন কাঠামোর জন্য। মূল পাখা দেহের ভেতরে গুটিয়ে যায় এবং শক্তি ও মালবাহী অংশ থেকে বিচ্ছিন্ন থাকে। নাকের মধ্য অঞ্চলের সামনের অংশে ছোট প্রসারণযোগ্য নিয়ন্ত্রণ-পাখা থাকে, যা পরিবর্তনশীল অবস্থায় গতিপথ সংশোধন ও স্থিতিকরণ করে।
- **দেহের ওপরের** অংশে সার্বজনীন পরিবর্তনযোগ্য পেলোড মডিউল থাকে। এর মাত্রা, সংযোগবিন্দু, ভর ও ভরকেন্দ্রের গ্রহণযোগ্য অবস্থান মানসম্মত; মডিউলটি মালবাহী, ট্যাঙ্কার, যাত্রীবাহী বা মিশ্রভাবে সাজানো যায়। উৎক্ষেপণের আগে ডকে এটি বসানো ও সরানো হয়; ওপরের দরজা খোলার পর কক্ষপথেও তা সম্ভব। মালখণ্ডে সংযুক্ত হাইড্রলিক বা তড়িৎযান্ত্রিক লিফট ও গাইড থাকে, যা অণুমাধ্যাকর্ষ্যে ক্রু ছাড়াই মডিউল স্বয়ংক্রিয়ভাবে বের করে।
- **সরে-খোলা ওপরের** দরজাগুলো ভারবহন কাঠামোর অংশ নয়; এগুলো বায়ুগতীয় আবরণ ও কক্ষপথে প্রবেশাধিকার দেয়। ভাঁজযোগ্য তাপ-ব্যবস্থাপনা রেডিয়েটর প্যানেল দরজায় সংযুক্ত। দরজা সম্পূর্ণ খুলে স্থির হওয়ার পর প্যানেল স্বয়ংক্রিয়ভাবে মেলে এবং অতিরিক্ত তাপ শূন্যস্থানে ছাড়তে তাতে শীতলক প্রবাহিত হয়।
- **শাটলের নাকে** বহুস্তরীয় কার্যকর বিন্যাস রয়েছে:
 - ওপরের নাক অঞ্চল—ব্রিজ, নিয়ন্ত্রণ, দিকনির্ণয় ও যোগাযোগ ব্যবস্থা;
 - মধ্য নাক অঞ্চল—ছোট প্রসারণযোগ্য পাখা ও নিয়ন্ত্রণ পৃষ্ঠের যন্ত্র;
 - নিচের নাক অঞ্চল—ক্রায়োজেনিক জ্বালানী ও শীতলকের ট্যাংক, যাতে তরলপ্রবাহের প্রতিরোধ কমে এবং বায়ুমণ্ডল ভেদের সময় নাকের সক্রিয় শীতলকরণ ব্যবস্থায় শীতলক দ্রুত পৌঁছায়।

এই বিন্যাস তাপ ও তরলপথ ছোট রাখে, নাকের তাপীয় জড়তা কমায় এবং উড্ডয়নের সবচেয়ে চাপপূর্ণ অংশে তাপরক্ষার নির্ভরযোগ্যতা বাড়ায়। সামগ্রিকভাবে শাটলটি কঠোরভাবে সংগঠিত, সম্প্রসারণযোগ্য ও মডুলার স্থাপত্য, যা অতিধ্বনিক উৎক্ষেপণ, কক্ষপথের কাজ, স্বয়ংক্রিয় নৌযাত্রা এবং দেহ গভীরভাবে না খুলেই পুনঃব্যবহারের উপযোগী।

4.3.3. দেহের তাপরক্ষা

শাটলের নাক ও তলা বহুস্তরীয় যৌগিক-ধাতব তাপরক্ষা ব্যবস্থায় সজ্জিত, যা অতিধ্বনিক উড্ডয়ন ও পরবর্তী জল-অবতরণের চরম তাপীয় ও গতিশীল চাপের জন্য তৈরি। এতে নিষ্ক্রিয় ও সক্রিয় উপাদান মিলিত:

- বাইরের তাপসহ স্তর, যা অল্প সময়ে হাজার হাজার ডিগ্রি ও তীব্র বিকিরণীয় উত্তাপ সহ্য করে;
- ভারবহন ধাতব অন্তস্তর, যা যান্ত্রিক ও কম্পনজনিত চাপ গ্রহণ করে;
- সক্রিয় শীতলকরণ চক্র, যা সবচেয়ে চাপপূর্ণ অঞ্চল—প্রধানত নাক ও তলার সামনের ধার—থেকে তাপ সরায়;

- স্থানীয় সংকটপূর্ণ অঞ্চলে পরিবর্তনযোগ্য ক্ষয়শীল উপাদান, যা মূল কাঠামোর ক্ষতি না করে নিয়ন্ত্রিতভাবে ক্ষয় হয়। তাপরক্ষা ব্যবস্থায় সমুদ্রে অবতরণের সময় উত্তপ্ত দেহ পানির সংস্পর্শে এলে সৃষ্ট তাপীয় আঘাত—তীব্র তাপমাত্রা-ঢাল ও চক্রাকার তাপীয় চাপ—বিবেচনা করা হয়েছে। সবচেয়ে চাপপূর্ণ উপাদানগুলো খণ্ডিত ও মডুলারভাবে বদলযোগ্য, ফলে নিয়মিত রক্ষণাবেক্ষণে মেরামত সহজ এবং পুনঃব্যবহারের আয়ু দীর্ঘ হয়।

4.3.4. পাখা

স্থিতিকরণ, গ্লাইড ও অবতরণের জন্য শাটলে দুই জোড়া প্রসারণযোগ্য পাখা আছে। বিরল বায়ুমণ্ডলীয় স্তরে পৌঁছানোর পর এগুলো খোলে।

- **সামনের জোড়া** পাখা গতিপথ সংশোধন, পিচ ও রোল স্থিতি এবং গতিশীল বিঘ্ন প্রশমন করে। গ্লাইডের জন্য বিরল বায়ুমণ্ডলীয় স্তরে পৌঁছানোর পর এগুলো খোলে।

প্রতিটি সামনের পাখার পরামিতি:

- দৈর্ঘ্য, গোড়া থেকে বিস্তার: প্রায় ৩৫ মিটার;
- গোড়া/প্রান্তের প্রস্থ: প্রায় ১৪/৭ মিটার;
- ক্ষেত্রফল: প্রায় ৩৬০–৪০০ মি^২।

- **পেছনের জোড়া** পাখা শাটলের মূল বায়ুগতীয় পৃষ্ঠ।

প্রতিটি পেছনের পাখার পরামিতি:

- দৈর্ঘ্য, গোড়া থেকে বিস্তার: প্রায় ১০০ মিটার;
- গোড়া/প্রান্তের প্রস্থ: প্রায় ১৪/৭ মিটার;
- ক্ষেত্রফল: প্রায় ১,০০০–১,১০০ মি^২।

পাখার মোট ক্ষেত্রফল প্রায় ২,৮০০–২,৯০০ মি^২। দেহের উত্তোলক আকৃতিও লিফটে অবদান রাখে এবং কার্যকর বায়ুগতীয় ক্ষেত্রফল প্রায় ২০–৩০% বাড়ায়।

উপধ্বনিক অবস্থায় পুরো বিন্যাস প্রায় $L/D \approx 9-13$ বায়ুগতীয় অনুপাত দেয়, ফলে স্থিতিশীল গ্লাইড ও নিয়ন্ত্রিত অবতরণস্থান নির্বাচন সম্ভব। সাধারণ গ্লাইড ও জল-অবতরণ গতি ৯০–১২০ মি/সেকেন্ড, অর্থাৎ প্রায় ৩২০–৪৩০ কিমি/ঘণ্টা। এই গতিতে নিরাপত্তা নিছক অনুভূমিক গতিতে নয়, বরং স্পর্শের উল্লম্ব গতি, আক্রমণ-কোণ ও গ্লাইড-পথে নির্ধারিত হয়।

4.3.5. প্যারাসুট ব্যবস্থা

জল-অবতরণের আঘাত কমাতে ও গ্রহণযোগ্য অবতরণ-সীমা বাড়াতে শাটলে পুনর্ব্যবহারযোগ্য প্যারাসুট-প্যারারফয়েল ব্যবস্থা আছে, যা সাধারণভাবে প্রস্তুত নরম অবতরণ চক্র হিসেবে কাজ করে।

- **স্থাপত্য ও অবস্থান।** ব্যবস্থায় দুটি প্যারারফয়েল অবস্থান আছে:

- একটি **ওপরের পশ্চাৎভাগে**;
- একটি **ওপরের অগ্রভাগে**, নাকের ঠিক পেছনে।

প্রতিটি অবস্থান $N+1$ বিন্যাসে —মূল ও সংরক্ষিত প্যারারফয়েল—স্বতন্ত্র প্যাক ও টান-রশিসহ তৈরি। প্যারারফয়েল এক বিন্দুতে নয়, ভারবহন **ফ্রেমে আড়াআড়ি সংযোগরেখায়** যুক্ত; এতে স্থানীয় চাপের শীর্ষ কমে এবং পিচ ও রোল স্থিতি বাড়ে। ক্যানোপিগুলো অনুদৈর্ঘ্য অক্ষে আলাদা, তাই একে অন্যকে প্রভাবিত বা জড়ায় না।

- **ক্ষেত্রফল ও কার্যপদ্ধতি।** প্যারারফয়েল যানের পুরো ওজন ধরে রাখার জন্য নয়; শেষ পর্যায়ে উল্লম্ব গতি কমিয়ে মসৃণ স্পর্শ তৈরি করে। আনুমানিক মান:

- একটি মূল প্যারারফয়েলের ক্ষেত্রফল: প্রায় ৪,৫০০–৬,০০০ মি^২;
- দুটি প্যারারফয়েল চালু থাকলে মোট সক্রিয় ক্ষেত্রফল: প্রায় ৯,০০০–১২,০০০ মি^২।

সংস্পর্শের সময় লক্ষ্যমাত্রা উল্লম্ব বেগ — $V_z \approx 1 \text{ m/s}$.

- **সক্রিয়করণ মানদণ্ড**। প্যারাশুট-প্যারাফয়েল ব্যবস্থা **শুধু প্রয়োজনে** ব্যবহৃত হয়। অবতরণ অ্যালগরিদম **মোট অতিভার**— বায়ুগতীয়, জড়তাময় ও জলগতীয় উপাংশের ভেক্টর যোগফল—বিবেচনা করে:

- স্পর্শের পূর্বাভাসিত মোট অতিভার **4g না ছাড়ালে** পাখায়, **প্যারাফয়েল ছাড়াই** অবতরণ হয়;
- **4g ছাড়ানোর** ঝুঁকি থাকলে ব্যবস্থা চালু হয়ে উল্লম্ব গতি লক্ষ্যমান পর্যন্ত কমায় এবং অবতরণকে মৃদু গ্লাইডে নেয়।

- **পুনঃব্যবহার**। প্যারাফয়েল, রশি ও সংযোগগুলো নিয়মিত পরিচর্যা—পরিদর্শন, শুকানো ও দ্রুত ক্ষয়মান অংশ বদল—সহ বারবার ব্যবহারের জন্য; দেহের ভারবহন কাঠামো খুলতে হয় না।

4.3.6. স্বয়ংসম্পূর্ণ শক্তি ও চালনা ইউনিট

শাটলে সম্পূর্ণ স্বয়ংসম্পূর্ণ শক্তি-চালনা ব্যবস্থা রয়েছে, যা কক্ষপথের কৌশল থেকে কয়েক মাসের স্বয়ংক্রিয় নৌযাত্রা পর্যন্ত পুরো মিশনচক্রের জন্য।

- **মূল শক্তির উৎস : অনবোর্ড পারমাণবিক রিঅ্যাক্টর।**

- **ধরন:** পরবর্তী প্রজন্মের কমপ্যাক্ট দ্রুত গলিত-লবণ রিঅ্যাক্টর বা উচ্চ-তাপ গ্যাস-শীতল রিঅ্যাক্টর। ভবিষ্যতে Helion Energy-র মতো ক্ষেত্র-সংকোচন নকশার কমপ্যাক্ট সংযোজন মডিউল ব্যবহার করা যেতে পারে।
- **ক্ষমতা:** বৈদ্যুতিক ১০–২০ MW; তাপীয় ৫০–১০০ MW।
- **উদ্দেশ্য:** সব অনবোর্ড ব্যবস্থা, চৌম্বক উত্তোলনের অতিপরিবাহী উপাদান, তড়িৎচৌম্বক **প্লাজমা ইঞ্জিন, সক্রিয় শীতলকরণ** ও স্বয়ংক্রিয় নৌচালককে **শক্তি দেওয়া। রিঅ্যাক্টরটি** শাটলের ৫–১০ বছরের পুরো সেবাজীবন জ্বালানি পুনর্ভরণ ছাড়া চলার জন্য।

- **অনবোর্ড অতিপরিবাহী উত্তোলন ও স্থিতিকরণ** ব্যবস্থা। দেহ বরাবর উচ্চ-তাপমাত্রা অতিপরিবাহীর চুম্বকযুক্ত ক্রায়োজেনিক মডিউল সংযুক্ত, যা অনবোর্ড ব্যবস্থা থেকে তরল নাইট্রোজেন বা হাইড্রোজেনে ঠান্ডা হয়। এগুলো উত্তোলন ও সক্রিয় স্থিতিকরণের জন্য শক্তিশালী মূল চৌম্বকক্ষেত্র তৈরি করে। সুড়ঙ্গের বাহ্যিক বিদ্যুৎ পুরো বন্ধ হলেও নিষ্ক্রিয় ‘রেল’ কুণ্ডলীর সঙ্গে আবেশীয় ক্রিয়ায়, অর্থাৎ ‘চৌম্বক দর্পণ’ প্রভাবে, শাটল উত্তোলন বজায় রাখে।

স্থিতিকরণ নিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থা স্তরক্রমিক:

- 1) **নিষ্ক্রিয় চক্র**, মাইক্রোসেকেন্ড: অতিপরিবাহী ও সুড়ঙ্গের কুণ্ডলীর আবেশীয় সংযোগ যেকোনো বিচ্যুতিতে ইলেকট্রনিকস ছাড়াই স্বয়ংক্রিয় প্রত্যাবর্তন বল তৈরি করে।
- 2) **হার্ডওয়্যার চক্র**, মাইক্রোসেকেন্ড থেকে মিলিসেকেন্ড: বিশেষ FPGA ও ASIC সার্কিট ভারসাম্যহীনতা শনাক্ত করে এবং নির্দিষ্ট অ্যালগরিদমে খণ্ড বদলায়।
- 3) **সফটওয়্যার চক্র**, মিলিসেকেন্ড থেকে কয়েক দশ মিলিসেকেন্ড: সীমিত AI-সহায়তায়ুক্ত অনবোর্ড কম্পিউটার ধীর সরে যাওয়া ও স্থানীয় ভারসাম্যহীনতা সামলাতে অতিপরিবাহী খণ্ডগুলোর মধ্যে কারেন্ট পুনর্বণ্টন করে; ন্যানোসেকেন্ড প্রতিক্রিয়া দরকার হয় না।

এই স্থাপত্য বিশ্লে মিলিসেকেন্ড প্রতিক্রিয়া দেয়, যা অতিধ্বনিক গতিতে ১৫,০০০ টনের শাটলের স্থিতি-চাহিদার চেয়ে বহু মাত্রায় দ্রুত।

- **মূল ইঞ্জিন: উচ্চ থ্রাস্টের তড়িৎচৌম্বক প্লাজমা ইঞ্জিন।**

- **নীতি:** অনবোর্ড রিঅ্যাক্টরে চালিত ম্যাগনেটোপ্লাজমাডাইনামিক (MPD) ইঞ্জিন বা পরিবর্তনশীল নির্দিষ্ট ইমপালস ম্যাগনেটোপ্লাজমা রকেট (VASIMR)।
- **থ্রাস্ট:** স্পন্দিত অবস্থায় ৫০–১০০ kN, অর্থাৎ ৫–১০ টন-বল পর্যন্ত; কক্ষপথ সংশোধন, কক্ষপথ ত্যাগ ও আন্তঃকক্ষপথ স্থানান্তরের জন্য যথেষ্ট।
- **কার্যদ্রব্য:** তরল জেনন, আর্গন বা হাইড্রোজেন; হাইড্রোজেন শীতলকরণেও ব্যবহৃত।
- **স্বয়ংক্রিয়তা:** অনবোর্ড AI ইঞ্জিন চালায় এবং কক্ষপথীয় স্টেশনে ডকিং, মাল খালাস ও প্রত্যাবর্তনের কৌশল নিজে গণনা ও সম্পন্ন করে।

- **তাপ ব্যবস্থাপনা :**

- **প্রসারণযোগ্য রেডিয়েটর।** মহাকাশে মেলা তরল-চক্রের প্যানেল, যা রিঅ্যাক্টর ও যন্ত্রপাতির অতিরিক্ত তাপ শূন্যস্থানে ছাড়ে।

- **অবস্থা-পরিবর্তন তাপ সঞ্চয়ক।** নাক ও সংকটপূর্ণ স্থানে থাকা জরুরি উপাদান। উৎক্ষেপণ ও পুনঃপ্রবেশে বায়ুমণ্ডল ভেদ করার সময় মেগাজুল মাত্রার সর্বোচ্চ তাপ শোষণ করে কাঠামোকে অতিরিক্ত গরম হওয়া থেকে বাঁচায়। মহাকাশ বা সমুদ্রে তাপ ধীরে রেডিয়েটর বা পরিবেশে ছাড়া হয়।
- **সক্রিয় শীতলকরণ।** উড্ডয়নের সময় তাপচাল ও সংকটপূর্ণ অংশ জরুরিভাবে ঠান্ডা করতে তরল হিলিয়াম/হাইড্রোজেনের বন্ধ চক্র।
- **অতিরিক্ত ও নিরাপত্তা:** দ্বৈত রিঅ্যাক্টর নিয়ন্ত্রণ, স্বতন্ত্র শীতলকরণ চক্র ও জরুরি তাপ অপসারণ। সমুদ্রে পতনসহ সব পরিস্থিতিতে কাঠামো নিরাপদ।

4.3.7. স্বয়ংক্রিয় অবতরণ ও সামুদ্রিক ব্যবস্থা

আটলান্টিকের নির্ধারিত এলাকায় জল-অবতরণের পর শাটল সম্পূর্ণ স্বয়ংক্রিয় সমুদ্রযানে পরিণত হয়। এর জন্য আছে:

- **চালনা ইউনিট।** দুটি প্রসারণযোগ্য আজিমুথ থ্রাস্টার বা জলজেট, যা কম গতিতে উচ্চ চালনক্ষমতা দেয়।
- **নৌযাত্রার শক্তি।** স্বাভাবিক অনবোর্ড পারমাণবিক/সংযোজন রিঅ্যাক্টর ন্যূনতম অবস্থায় চালক ও অনবোর্ড ব্যবস্থায় বিদ্যুৎ দেয়। সক্রিয় কোরে কয়েক মাসের স্বয়ংক্রিয় যাত্রার জ্বালানি থাকে।
- **দিকনির্ণয় ও যোগাযোগ।** উপগ্রহ GPS/GLONASS ও জড়তাময় নেভিগেশন, সমুদ্রপৃষ্ঠ চেনার রাডার ও লাইডার এবং ভূস্থির উপগ্রহে নির্ভরযোগ্য যোগাযোগ।
- **চূড়ান্ত ব্রেক ব্যবস্থা।** পানি ছোঁয়ার ঠিক আগে অবশিষ্ট ১০০-১৫০ কিমি/ঘণ্টা গতি কমাতে সমন্বিত ব্যবস্থা ব্যবহৃত হয় : **স্থিতি ও প্রাথমিক ব্রেকের জন্য ছোট ড্রাগ প্যারাসুট এবং উল্লম্ব গতি নিখুঁতভাবে কমাতে মূল প্লাজমা ইঞ্জিনের ক্ষণিক স্পন্দন।** জল- **অবতরণের পর প্যারাসুট বিচ্ছিন্ন হয়।**

এই বিন্যাসে শাটল অবতরণের পর তাৎক্ষণিক সাহায্য ছাড়াই নিজে নিবন্ধিত বন্দর বা টাগের সাক্ষাৎস্থলে যেতে পারে। ঝড়ো সমুদ্রে স্বয়ংক্রিয়ভাবে থাকতে, দীর্ঘ যাত্রা করতে এবং নির্ধারিত রক্ষণাবেক্ষণের জন্য ঠিক ডকে পৌঁছাতে পারে—মহাকাশযান থেকে রোবটচালিত সমুদ্রযানে রূপ নিয়ে।

4.3.8. AstroLiner-S: প্রাথমিক / সরল সংস্করণ

StarRoad বাস্তবায়নের শুরুর পর্যায়ে এবং মৌলিক, প্রযুক্তিগতভাবে সরল ও পরিচালনায় বেশি রক্ষণশীল বিন্যাস হিসেবে AstroLiner-S (Simplified / Start) প্রাথমিক শাটল ব্যবহারের পরিকল্পনা রয়েছে।

এটি AstroLiner-এর পূর্ণ কার্যকর কিন্তু শক্তি ও ব্যবস্থায় সরল সংস্করণ, যা পথের প্রাথমিক পরিচালনা, প্রথমদিকের মালবাহী ও মানববাহী উৎক্ষেপণ এবং প্রযুক্তিগত, পরিচালন ও নিয়ন্ত্রক ঝুঁকি ধাপে কমানোর জন্য।

- **AstroLiner -S- এর মূল ধারণা।** এটি StarRoad-এর মৌলিক নীতি—জড়তার বলে বায়ুমণ্ডল ভেদ—বাস্তবায়ন করে, তবে অনবোর্ড পারমাণবিক বা সংযোজন শক্তির উৎস ছাড়া এবং মূল সংস্করণের উৎক্ষেপণ-আকার ও ভর পুরো বজায় রেখে।

অত্যধিক শক্তিনির্ভর সব কাজ—ত্বরণ, উত্তোলন ও সুড়ঙ্গ স্থিতিকরণ—পুরোপুরি ভূমিভিত্তিক অবকাঠামোতে রাখা হয়েছে।

AstroLiner-S শাটলটি:

- স্বয়ংসম্পূর্ণ পরিবহনযান;
- সম্পূর্ণ পুনর্ব্যবহারযোগ্য;
- নিজে কক্ষপথে উঠতে, ছাড়তে ও ফিরতে সক্ষম;
- তবে সুড়ঙ্গের বাইরে শুধু রাসায়নিক চালনা ব্যবহার করে;
- এবং উচ্চক্ষমতার আয়নকারী বিকিরণ উৎস বহন করে না।
- **শক্তি ও অতিপরিবাহী ব্যবস্থা।** AstroLiner-S বিন্যাস থেকে সম্পূর্ণ বাদ:
 - পারমাণবিক ও সংযোজন শক্তিকেন্দ্র;
 - সংশ্লিষ্ট বিকিরণ, তাপ ও দুর্ঘটনার ঝুঁকি;
 - সুড়ঙ্গ ও প্রবেশদ্বার অংশে অপরিবর্তনীয় দৃশ্যের পরিস্থিতি।

উত্তোলন, স্থিতিকরণ ও পথের সঙ্গে ক্রিয়ার অতিপরিবাহী উপাদানগুলো:

- উৎক্ষেপণের আগে কারেন্টে চার্জ করা হয়;
- স্থায়ী-কারেন্ট অবস্থায় নেওয়া হয়;
- পরস্পর বিচ্ছিন্ন থাকে এবং অনবোর্ড ব্যবস্থা নিয়ন্ত্রণ করে।

অনবোর্ড ইলেকট্রনিকস, নিয়ন্ত্রণ ও সুরক্ষা ব্যাটারি এবং জড়তাময় সঞ্চয়ক বা ফ্লাইহুইল থেকে শক্তি পায়, যেগুলো সময়ের অতিরিক্ত মজুতসহ পুরো সুড়ঙ্গ-ত্বরণ চক্রের জন্য নির্ধারিত।

ত্বরণের সময় অতিপরিবাহী চক্রের সক্রিয় নিয়ন্ত্রণ ছোট সংশোধনী কারেন্ট ও জরুরি অবস্থায় সীমিত; ফলে অনবোর্ড উচ্চক্ষমতার অবিচ্ছিন্ন শক্তির উৎস লাগে না।

কক্ষপথে ভাঁজযোগ্য সৌরপ্যানেল সক্রিয় শক্তির উৎস।

○ সুড়ঙ্গের বাইরে চালনা

AstroLiner-S-এর সব কক্ষপথীয় কাজ রাসায়নিক চালনায় হয়।

শাটলে থাকে:

- মাঝারি থ্রাস্টের মূল রাসায়নিক ইঞ্জিন, LOX/LH₂ বা LOX/LCH₄ শ্রেণি;
- দ্বৈত অভিমুখন ও জরুরি নিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থা (RCS)।

চালনা ব্যবস্থা দেয়:

- বায়ুমণ্ডল ছাড়ার পর লক্ষ্য কক্ষপথে চূড়ান্ত আরোহণ;
- কক্ষপথীয় পরামিতি সংশোধন;
- কক্ষপথ ত্যাগ;
- নিয়ন্ত্রিত বায়ুমণ্ডলীয় পুনঃপ্রবেশ ও প্রত্যাবর্তন।

এই সংস্করণে বৈদ্যুতিক ও চৌম্বক-প্লাজমা ইঞ্জিন না থাকার কারণ অনবোর্ড উচ্চক্ষমতার বিদ্যুৎ উৎসের অনুপস্থিতি; পুরো ব্যবস্থার স্থাপত্যগত সীমা হিসেবে এটি বিবেচিত নয়।

○ প্রত্যাবর্তন ও পুনঃব্যবহার

AstroLiner-S সক্ষম:

- স্বয়ংক্রিয়ভাবে কক্ষপথ ছাড়তে;
- অল্প ঢালে নিয়ন্ত্রিতভাবে বায়ুমণ্ডলে ঢুকতে;
- বায়ুগতীয় গ্লাইড করতে;
- পাখা ও প্যারাশুট-প্যারাফয়েল ব্যবস্থায় সমুদ্রে নামতে।

রিঅ্যাক্টর না থাকায় অনেক সহজ হয়:

- সামুদ্রিক পরিচালনা;
- নিয়মিত রক্ষণাবেক্ষণ;
- অস্বাভাবিক অবতরণের পর যান পুনরুদ্ধার।

○ StarRoad উন্নয়নে AstroLiner-S -এর ভূমিকা

AstroLiner-S-কে দেখা হয়:

- StarRoad শাটলের প্রথম ধারাবাহিক উৎপাদন সংস্করণ হিসেবে;
- উৎক্ষেপণ ও ক্রটির পরিসংখ্যান সংগ্রহের মঞ্চ হিসেবে;
- ব্যবস্থা দ্রুত চালুর উপায় হিসেবে;
- প্রাথমিক কক্ষপথীয় অবকাঠামোর মৌলিক পরিবহন হিসেবে।

প্রকল্প এগোলে, কমপ্যাক্ট উচ্চক্ষমতার শক্তির উৎস এলে ও পরিচালন অভিজ্ঞতা জমলে AstroLiner-S-কে ধাপে পূর্ণাঙ্গ AstroLiner দিয়ে সম্পূরক বা প্রতিস্থাপন করা যাবে; তাতে উচ্চক্ষমতার অনবোর্ড শক্তিকেন্দ্র ও তড়িৎচৌম্বক প্লাজমা ইঞ্জিন থাকবে।

তাই AstroLiner-S কোনো আপস নয়; এটি ব্যবস্থার যৌক্তিক প্রাথমিক স্তর, যা মূল পথের মৌলিক স্থাপত্য না বদলে StarRoad আগে, বেশি নিরাপদে ও কম পদ্ধতিগত ঝুঁকিতে চালু করতে দেয়।

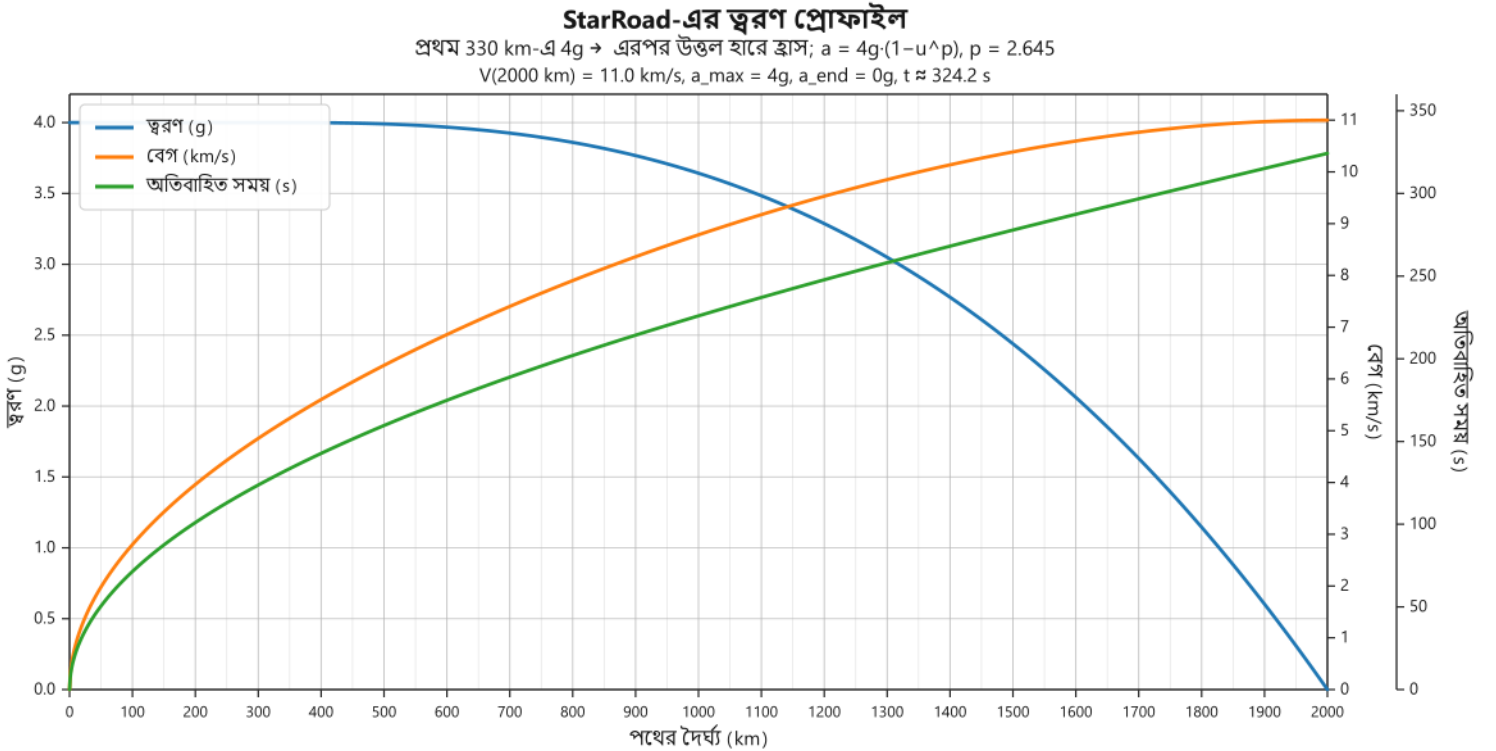
৫. উৎক্ষেপণ প্রস্তুতি থেকে অবতরণের পর রক্ষণাবেক্ষণ পর্যন্ত পরিচালনাচক্র

৫.১. প্রস্তুতি ও উৎক্ষেপণ

মালবোঝাই শাটলটি Batanga-র কাছের উৎক্ষেপণ কক্ষে রাখা হয়। প্রথমে শাটলের নিজস্ব ব্যবস্থা, তারপর ত্বরণযন্ত্রের ব্যবস্থা পরীক্ষা করা হয়। এরপর গ্যাসগতীয় প্রবেশদ্বারের উৎক্ষেপণ-পূর্ব পরীক্ষা চলে। শাটলের অতিপরিবাহীগুলোতে বিদ্যুৎপ্রবাহ সঞ্চার করা হয়; তারপর চৌম্বক উত্তোলন চালু করে পরীক্ষা করা হয়। সুড়ঙ্গটি আগেই বায়ুশূন্য করা থাকে। নির্দেশ পেলে ত্বরণযন্ত্রের প্রথম খণ্ডগুলোতে স্পন্দিত শক্তি সরবরাহ শুরু হয়।

৫.২. সুড়ঙ্গে ত্বরণ

- ০-330 কিমি। শুরুর অনুদৈর্ঘ্য ত্বরণ $\sim 4g$ । শক্তির উল্লেখযোগ্য অংশ উত্তোলন ও অভিকর্ষ অতিক্রমে ব্যয় হয়।
- 330-~1,800 কিমি, s-বাঁকের নিম্নগামী অংশ। অনুদৈর্ঘ্য ত্বরণ শুরুর $4g$ থেকে ধীরে ধীরে শূন্যে নামে। ভূগর্ভস্থ বাঁক পেরোনোর সময় শাটলটি $\sim 4g$ পর্যন্ত ভার সহ্য করে। চারপাশের তড়িৎচুম্বকীয় উপাদান গতিপথ স্থিতিশীল রাখে।
- ~1,800-2,050 কিমি, s-বাঁকের উর্ধ্বগামী অংশ। প্রবেশদ্বারের কাছে আসতে আসতে ত্বরণ শূন্যে নেমে যায়। শেষ 50 কিমি শাটলটি ~ 11 কিমি/সেকেন্ড গতিতে জড়তার বলে চলে।



৫.৩. বায়ুমণ্ডলীয় গেটওয়ে দিয়ে প্রস্থান

- উঁচু উৎক্ষেপণস্থলের কারণে শাটলটি প্রবেশদ্বার থেকে মাত্র ~ 30 কিমির মধ্যেই সমুদ্রপৃষ্ঠের 10 কিমির বেশি উচ্চতায় পৌঁছে যায়; ফলে ভূখণ্ডে অভিঘাত-তরঙ্গের প্রভাব সর্বনিম্ন থাকে। শাটল উৎক্ষেপণের এক মিনিট আগে যান্ত্রিক দ্বার না খুলেই গ্যাসগতীয় প্রবেশদ্বারের বলয়গুলো পরীক্ষামূলকভাবে চালু করা হয়। শাটল সুড়ঙ্গপথের 45% অতিক্রম করলে বলয়গুলোর মধ্য দিয়ে সংকুচিত বাতাসের অতিধ্বনি প্রবাহ ছাড়া হয়; সুড়ঙ্গ বায়ুশূন্য করার সময় শেষ খণ্ডের পাম্পগুলো এই বাতাস জমা করেছিল। শাটল পেরোনোর ~ 10 সেকেন্ড আগে হাইড্রোজেন সরবরাহ করে গ্যাসগতীয় প্রতিবন্ধককে মূল দহন অবস্থায় সক্রিয় করা হয়। এতে উত্তপ্ত, আংশিক আয়নিত গ্যাসের স্থিতিশীল শঙ্কু-আকৃতির অতিধ্বনি প্রবাহ তৈরি হয়। বলয়গুলোর সফল সক্রিয়করণ ও উত্তপ্ত প্রতিবন্ধক-ঢাল শঙ্কু তৈরির 3 সেকেন্ড পরে যান্ত্রিক প্রবেশদ্বার খোলে।

- প্রতিবন্ধকটি সুড়ঙ্গের বায়ুশূন্যতাও অক্ষুণ্ণ রাখে এবং প্রথম তাপীয় অভিঘাত নরম করে। শাটলটি আগে থেকে প্রস্তুত বিরল ও উত্তপ্ত গ্যাসের অঞ্চল কয়েক মিলিসেকেন্ডে পার হয়। মাধ্যম বদলের সময় অতি-স্বল্পস্থায়ী অভিঘাত-মুখ দূর করে এই গুরুত্বপূর্ণ প্রযুক্তি প্রাথমিক বায়ুগতীয় ক্রিয়ার সময়রেখা বদলে দেয়।
- গ্যাসগতীয় প্রতিবন্ধক মোট বায়ুগতীয় বল কমায় না; বরং অভিঘাতজনিত ভারকে মাইক্রোসেকেন্ডের পরিসর থেকে মিলিসেকেন্ডের পরিসরে ছড়িয়ে দেয়। এতে শাটলের কাঠামোর স্থানীয় চাপ, কম্পন ও তাপীয় অভিঘাত অত্যন্ত কমে।
- শাটল অতিক্রমের সঙ্গে সঙ্গে যান্ত্রিক দরজা খোলে; এরপর জেট বলয়গুলো অবিলম্বে বন্ধ করা হয়।

৫.৪. বায়ুমণ্ডল অতিক্রম

ব্যালিস্টিক গতিপথে শাটলটি নিজের জড়ভর ও দৃঢ় কাঠামো ব্যবহার করে বায়ুমণ্ডলের ঘন স্তর ভেদ করে। প্রথম 10–20 সেকেন্ডে তাপীয় ও গতীয় ভার সর্বোচ্চ হয়।

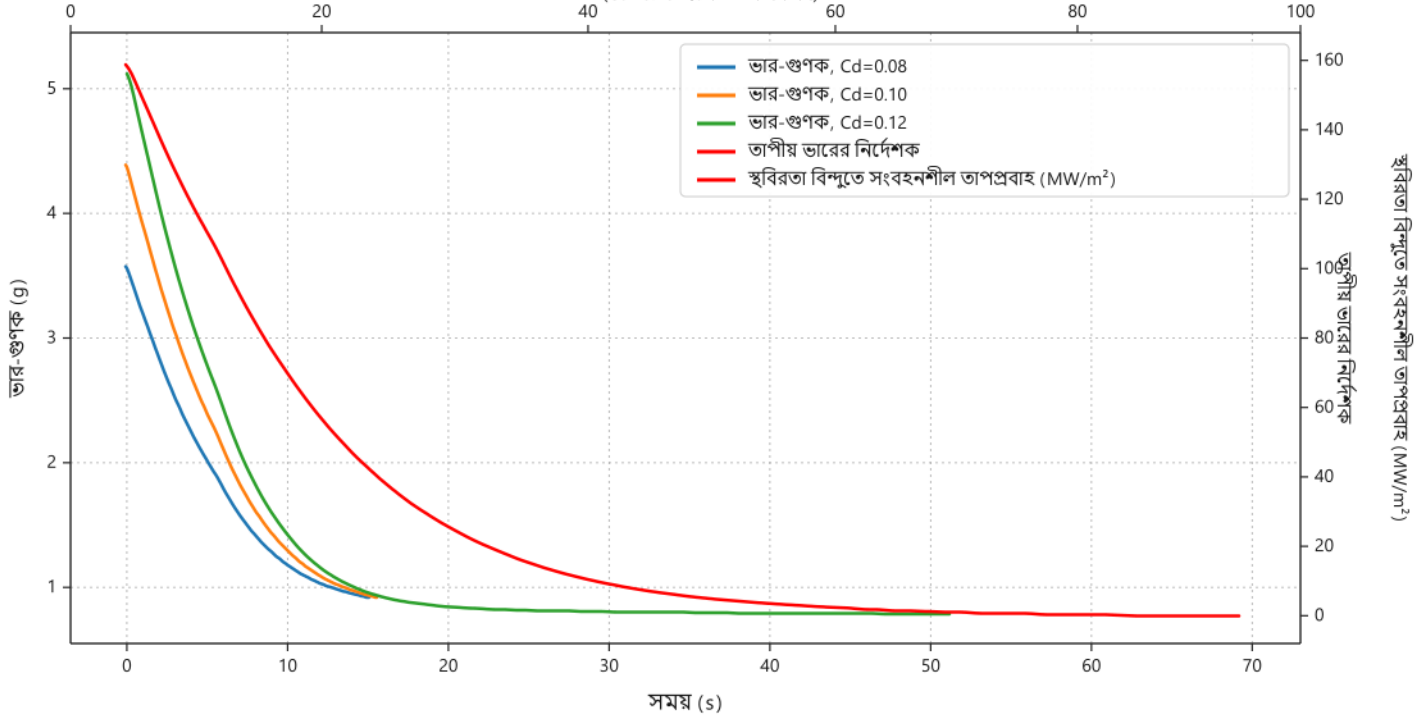
- **গুরুত্বপূর্ণ ব্যাখ্যা।** গ্যাসগতীয় প্রতিবন্ধকের অঞ্চল ছাড়ার সঙ্গে সঙ্গেই শাটলটি নির্ধারিত ~3,400 মিটার উচ্চতায় স্বাভাবিক বায়ুমণ্ডলের সঙ্গে পূর্ণ সংস্পর্শে আসে। গতিপথ, তাপপ্রবাহ ও ভারের সব হিসাব বায়ুমণ্ডলের সঙ্গে সম্পূর্ণ বায়ুগতীয় মিথস্ক্রিয়ার ভিত্তিতে করা হয়; কোনো “গ্যাস ঢাল”, “নালি” বা শাটলের সঙ্গে চলা বিরল গ্যাসীয় আয়তন ধরে নেওয়া হয় না।

StarRoad: সময় ও উচ্চতার সঙ্গে যান্ত্রিক ও তাপীয় ভার

$C_d = 0.08, 0.10, 0.12$ (C_d হলো বায়ুগতীয় প্রতিরোধ সহগ)

সমুদ্রপৃষ্ঠ থেকে উচ্চতা (km)

($C_d=0.10$ প্রক্ষেপপথ বরাবর)



৫.৫. মহাকাশে প্রবেশ ও কক্ষীয় পরিচালনা

বায়ুমণ্ডল ছাড়ার পর তাপ বের করতে বিকিরক খোলা হয়। এরপর সূক্ষ্ম গতিপথ সংশোধন ও লক্ষ্য কক্ষপথে পৌঁছাতে শাটলটি নিজস্ব তড়িৎচুম্বকীয় প্লাজমা ইঞ্জিন চালু করে—অনেক সময় সরাসরি ভূস্থির কক্ষপথের ওপারে বা Lagrange বিন্দুর দিকে। তারপর পেলোড মোতায়ন করা হয়। AstroLiner-S বিন্যাসে চূড়ান্ত কক্ষপথ-প্রবেশ ও কক্ষপথ সংশোধন রাসায়নিক চালনা ব্যবস্থা দিয়ে হয়।

৫.৬. কক্ষপথ ত্যাগ ও প্রত্যাবর্তন

পূর্ণক্ষম AstroLiner কক্ষপথ ত্যাগে তড়িৎচুম্বকীয় প্লাজমা ইঞ্জিন ব্যবহার করে। AstroLiner-S বিন্যাসে কক্ষপথ ত্যাগের জন্য গতি কমানো, সংশোধন ও শেষ কৌশলগুলো রাসায়নিক চালনা ব্যবস্থা দিয়ে করা হয়।

৫.৭. সমুদ্রে অবতরণ

Gabon-এর কাছে আটলান্টিক মহাসাগরের ওপর গতি কমাতে ব্রেকিং প্যারাসুট ব্যবস্থা খোলা হয়। শাটলটি অল্প আক্রমণ-কোণে তার মজবুত তলদেশের ওপর জলাবতরণ করে; উত্তপ্ত পৃষ্ঠের সঙ্গে ঠান্ডা পানির সংস্পর্শ সহ্য করার জন্য তলদেশটি তৈরি। জলাবতরণের পর প্রপেলার বা জল-জেট খোলা হয়।

৫.৮. টেনে নেওয়া ও রক্ষণাবেক্ষণ

শাটলের নিজস্ব রিঅ্যাক্টরচালিত ইঞ্জিন—অথবা শাটলের ব্যবস্থা বিকল হলে প্রস্তুত টাগবোট—যানটিকে পরিদর্শন, রক্ষণাবেক্ষণ, তাপরক্ষা মেরামত ও পরের যাত্রার প্রস্তুতির জন্য বন্দর কমপ্লেক্সে নিয়ে যায়। AstroLiner-S বিন্যাসে ব্যাটারি, সহায়ক শক্তি ইউনিট বা প্রস্তুত টাগবোট বন্দরে ফেরার ব্যবস্থা করে।

৬. বাস্তবায়ন, সময়সূচি, প্রয়োজনীয়তা ও শিল্পকেন্দ্র

৬.১. প্রকল্পের ধাপ

StarRoad বাস্তবায়নকে প্রযুক্তিগতভাবে সম্পর্কিত ও অর্থনৈতিকভাবে যৌক্তিক কয়েকটি ধাপের ধারাবাহিকতা হিসেবে পরিকল্পনা করা হয়েছে। প্রতিটি ধাপের সুস্পষ্ট লক্ষ্য ও সাফল্যের মানদণ্ড আছে এবং সেটি পরের ধাপের অবকাঠামো তৈরি করে, ফলে প্রযুক্তিগত ও আর্থিক ঝুঁকি কমে।

৬.১.১. ধাপ ০: ধারণা ও পরীক্ষা (২-৫ বছর)

- **লক্ষ্য:** ভৌত নীতিগুলো যাচাই, পরীক্ষাগারে গুরুত্বপূর্ণ প্রযুক্তি বিকাশ এবং পরবর্তী প্রকৌশলের ভিত্তি তৈরি।
- **প্রধান কাজ**

1. ত্বরণ, প্রবেশপথ পরিচালনা ও বায়ুগতীয় অভিঘাতসহ সব প্রক্রিয়ার বিস্তারিত গাণিতিক ও CFD মডেলিং।
2. আন্তর্জাতিক জোট গঠন এবং প্রাথমিক রাজনৈতিক ও আইনি চুক্তি।
3. পুরো রুটে ভূতাত্ত্বিক ও পরিবেশগত জরিপ।
4. মূল স্থানের বাইরে গবেষণা পরীক্ষাকেন্দ্র স্থাপন:

অতিপরিবাহী ভাসমানতা মডিউল ও স্পন্দিত বিদ্যুৎ-সরবরাহ ব্যবস্থার বেঞ্চ পরীক্ষা;

স্থিতিশীল ক্রমবদলকারী বাধা তৈরি করা সম্ভব কি না নিশ্চিত করতে গ্যাস-গতীয় প্রবেশপথের 1:10 মাপের নমুনা নির্মাণ ও পরীক্ষা;

নির্বাত ব্যবস্থা, হালকা পরীক্ষাবস্তুর চৌম্বকীয় ত্বরণ এবং নিরাপত্তা ব্যবস্থার সমন্বয় যাচাই করতে ১-২ কিমি দীর্ঘ ছোট নির্বাত প্রদর্শনী সুড়ঙ্গ খনন।

- **সাফল্যের মানদণ্ড:** গেটওয়ে, উত্তোলন ও স্থিতিকরণের প্রধান সমাধানের বাস্তবতা নিশ্চিত করা পরীক্ষামূলক তথ্য এবং ধাপ ১-এর বিস্তারিত প্রকৌশল নকশার প্রস্তুতি।

৬.১.২. ধাপ ১: অবকাঠামো ও শক্তিভিত্তি (৫-৭ বছর)

- **লক্ষ্য:** প্রকল্পের 'শক্তির মেরুদণ্ড' গড়া এবং বাস্তব স্থানে রোবটচালিত নির্মাণ বিকাশ।
- **প্রধান কাজ**

1. ২ মিটার ব্যাসের মানসম্মত রোবোটিক সুড়ঙ্গ-খনন ব্যবস্থার ক্ষুদ্র ধারাবাহিক উৎপাদন।
2. প্রাথমিক তাপ-স্থিতিকরণ বর্তনী গড়তে ভূতাপীয় স্বয়ংক্রিয় তাপ-শক্তি ব্যবস্থার মূল সংগ্রাহক সুড়ঙ্গের প্রথম জোড়া পুরো পথজুড়ে (~২,০৫০ কিমি) সমান্তরালে খনন।
3. রুটের প্রধান স্থানে সরাসরি বায়ু থেকে কার্বন সংগ্রহে (DAC) পাওয়া অতিসংকট CO₂ ব্যবহারকারী প্রথম ভূতাপীয় বিদ্যুৎকেন্দ্র নির্মাণ।
4. ভূতাপীয় সংগ্রাহকের ওপর ছোট ব্যাসের পরীক্ষামূলক নমুনা সুড়ঙ্গ—D=2 মিটার, L=2,050 কিমি—খনন এবং তাতে প্রাথমিক শূন্যস্থান, যোগাযোগ ও পরিষেবা ব্যবস্থা স্থাপন।

- **সাফল্যের মানদণ্ড:** স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপশক্তি ব্যবস্থার ন্যূনতম বিন্যাস পুরোপুরি সচল ও শক্তিতে স্বনির্ভর; দ্রুত রোবটচালিত খনন প্রমাণিত এবং পরবর্তী সম্প্রসারণের ভিত্তি তৈরি।

৬.১.৩. ধাপ ২: ক্ষুদ্র-পরিসর যাচাই (‘বৈজ্ঞানিক ও যন্ত্রায়ন কমপ্লেক্স’ মর্যাদা) (৪-৬ বছর)

- **লক্ষ্য:** বাস্তবসম্মত গতিতে ব্যবস্থাগুলোর সমন্বয় ও নিরাপত্তা যাচাই এবং অনন্য পরীক্ষামূলক তথ্য সংগ্রহ।
- **প্রধান কাজ**
 1. ছোট পরীক্ষাসুড়ঙ্গে কয়েক টন পর্যন্ত জড় পরীক্ষণ-পিণ্ডকে 1-11 কিমি/সেকেন্ড গতিতে ত্বরিত ও ব্রেক করা।
 2. একটি ছোট পরীক্ষামূলক শাটল পার করিয়ে ১:৫ গ্যাস-গতীয় গেটওয়ে নমুনার পূর্ণ-পরিসর পরীক্ষা।
 3. ভিন্ন কাঠামো ও তাপ-সুরক্ষার পরীক্ষণ-পিণ্ড উৎক্ষেপণ করে ‘জড়তাজনিত আঘাতক’ ধারণা পরীক্ষা এবং অতিভার ও তাপপ্রবাহের তথ্য সংগ্রহ।
 4. অতিপরিবাহী চুম্বক ও তাপ সঞ্চায়কসহ পূর্ণ আকারের শাটলের প্রধান ব্যবস্থার বিস্তারিত নকশা ও নমুনা নির্মাণ শুরু।
- **সাফল্যের মানদণ্ড:** সব সমন্বয় ব্যবস্থা স্থিতিশীল ও নিরাপদে চলে; গ্যাস-গতীয় প্রবেশপথের কার্যকারিতা নিশ্চিত হয়; পরীক্ষায় প্রমাণিত হয় যে ভর বাড়লে একক ভরের ওপর চাপ কমে; শাটলের প্রাথমিক নকশা শেষ হয়।

৬.১.৪. ধাপ ৩: সম্পূর্ণ কার্যকর অংশ ও শাটল নমুনা (৪-৭ বছর)

- **লক্ষ্য:** উল্লেখযোগ্য দীর্ঘ অংশে চূড়ান্ত বিন্যাসের ব্যবস্থাগুলো সমন্বয় ও পরীক্ষা এবং উড্ডয়নযোগ্য নমুনা তৈরি।
- **প্রধান কাজ**
 1. মূল ত্বরণ সুড়ঙ্গের ৫০-২০০ কিমি সম্পূর্ণ কার্যকর অংশ, চূড়ান্ত ১৭.৫ × ১২.৫ মি প্রস্থচ্ছেদসহ, সব কুণ্ডলী, শক্তি সঞ্চয় ও পরিষেবা সুড়ঙ্গসহ নির্মাণ।
 2. এই অংশের নিচে ভূতাপীয় ব্যবস্থাকে পূর্ণ সাত-সুড়ঙ্গ বিন্যাসে সম্প্রসারণ।
 3. প্রণোদনাবিহীন পূর্ণ আকারের শাটল নমুনা নির্মাণ এবং ভূমিতে নিম্ন-তাপ ব্যবস্থা, কাঠামোগত শক্তি ও তাপ-সুরক্ষার ব্যাপক পরীক্ষা।
 4. সমন্বিত সুড়ঙ্গ পরীক্ষা: শাটল-সমতুল্য ভরকে ৮g পর্যন্ত চাপ ও ~৪ কিমি/সেকেন্ড পর্যন্ত বেগে ত্বরণ ও ব্রেক করা। সব জরুরি প্রোটোকল (সতর্কতা ১-৩) যাচাই।
 5. পূর্ণ কার্যকর AstroLiner-এর জন্য একটি কমপ্যাক্ট অনবোর্ড পারমাণবিক রিঅ্যাক্টর তৈরি, ভূমিতে পরীক্ষা ও প্রত্যয়ন।
- **সাফল্যের মানদণ্ড:** গুরুতর ক্ষতি ছাড়াই বহুবার ত্বরণ ও জরুরি থামার চক্র সম্পন্ন; শক্তি পুনরুদ্ধারের কার্যকারিতা নিশ্চিত; উড্ডয়ন শাটল ও রিঅ্যাক্টর চূড়ান্ত সমন্বয়ের জন্য প্রস্তুত।

৬.১.৫. ধাপ ৪: দৈর্ঘ্য সম্প্রসারণ ও চালু করা (১০-১৫ বছর)

- **লক্ষ্য:** প্রথম লাইন সম্পন্ন, শাটল সমন্বয় এবং পরিচালন গতি অর্জন।
- **প্রধান কাজ**
 1. অনেক সুড়ঙ্গ-খনন যন্ত্র সমান্তরালে চালিয়ে ত্বরণ সুড়ঙ্গকে ধাপে ধাপে 2,050 কিমি নকশা দৈর্ঘ্যে বাড়ানো।
 2. পুরো রুটে ভূতাপীয় অবকাঠামো ও স্পন্দিত শক্তি সঞ্চায়ক সম্প্রসারণ।
 3. মোহি পর্বতে উচ্চতায় অবস্থিত বায়ুমণ্ডলীয় প্রবেশপথের চূড়ান্ত কমপ্লেক্স নির্মাণ।
 4. শাটলের অভ্যন্তরীণ ব্যবস্থা সমন্বয় এবং ভূমি ও সুড়ঙ্গে কম গতির পরীক্ষা।
 5. ১৫,০০০ টন ও ~১১ কিমি/সেকেন্ড নকশামানে পৌঁছানো পর্যন্ত বেগ ও ভর ক্রমশ বাড়িয়ে ধাপে ধাপে উৎক্ষেপণ।
- **সাফল্যের মানদণ্ড:** শাটলের প্রথম সফল হাইপারসনিক উৎক্ষেপণ লক্ষ্য কক্ষপথে পেলোড পৌঁছে দেয়; মাসে 1-2 উৎক্ষেপণের নকশা হার অর্জিত হয়।

৬.১.৬. ধাপ ৫: সম্প্রসারণ ও শিল্প পরিচালনা (চলমান)

- **লক্ষ্য:** StarRoad-কে ক্রমবর্ধমান বৈশ্বিক অবকাঠামোতে পরিণত করা।

০. প্রধান কাজ

1. প্রথম লাইন পরিচালনা এবং পণ্য তোলা, পরিষেবা ও ফিরে আসার সরবরাহচক্র পরিমার্জন।
2. পণ্যপ্রবাহ বাড়াতে দ্বিতীয় ও পরবর্তী সমান্তরাল লাইনের নির্মাণ শুরু।
3. প্রকল্পের শিল্পকেন্দ্রকে ভিত্তি করে কক্ষীয় জাহাজ নির্মাণ ও প্রক্রিয়াকরণ স্থাপনা গড়া।
4. মানুষ ও বিশেষ পণ্যের জন্য ছোট ত্বরক নিয়ে 'শাখা' নেটওয়ার্ক তৈরি।

- ০. **সাফল্যের মানদণ্ড:** কক্ষপথে পৌঁছানোর খরচ \$10/কেজির নিচে; প্রতিদিন উৎক্ষেপণ; পরবর্তী প্রধান লাইনের অনুমোদিত পরিকল্পনা আছে এবং নির্মাণ শুরু হয়েছে।

৬.২. শিল্পকেন্দ্র

- ০. **উপকূলীয় কমপ্লেক্স (ন্যাঙ্গা নদীর মোহনা, গ্যাবন):** শাটল নির্মাণ, সুড়ঙ্গের প্রাথমিক অংশের মডিউল উৎপাদন এবং শাটল রক্ষণাবেক্ষণের প্রধান ঘাঁটি-বন্দর।
- ০. **উচ্চভূমি কমপ্লেক্স (মোহি পর্বত ও দক্ষিণ মালভূমি, কঙ্গো গণতান্ত্রিক প্রজাতন্ত্র):** উচ্চ-গতির অংশ ও শেষ S-বাঁকের মডিউল উৎপাদন এবং গেটওয়ে প্রক্রিয়ার সংযোজন ও রক্ষণাবেক্ষণ। স্থানে তিন-চ্যানেলের হাইড্রোজেন তড়িৎবিশ্লেষণ ও সঞ্চয় ব্যবস্থা থাকবে; জরুরি অবস্থাতেও প্রতিটি চ্যানেল একাই গেটওয়ের গ্যাস-গতীয় বাধার তিনটি ইঞ্জিন বলয়কে জ্বালানি দিতে পারবে। তড়িৎবিশ্লেষণের বিদ্যুৎ প্রকল্প গ্রিডে যুক্ত স্থানীয় ভূতাপীয় স্বয়ংক্রিয় তাপ-শক্তি ব্যবস্থা, জলবিদ্যুৎ, সৌর ও পারমাণবিক উৎস থেকে আসবে।

6.3. সামগ্রিক সময়সীমা

প্রকল্পে বহু উন্নত কিন্তু বর্তমানে বাস্তবায়নযোগ্য প্রযুক্তি ও প্রকৌশল সমাধান, সমান্তরালে কাজ করা বহু সুড়ঙ্গ-খননযন্ত্র, অবকাঠামো স্থাপন এবং দুটি উৎপাদনকেন্দ্র দরকার। তাই ধাপ ০-এর শুরু থেকে ধাপ ৪-এর প্রথম বাণিজ্যিক উৎক্ষেপণ পর্যন্ত প্রথম সুড়ঙ্গ বাস্তবায়নে প্রায় ২৫-৪০ বছর লাগবে। এটি ITER ও LIGO-র মতো অন্যান্য মহাবিজ্ঞান প্রকল্পের সময়ের সমান। এই অবস্থায় অগ্রগতি মৌলিক প্রযুক্তিগত বাস্তবতার চেয়ে অর্থায়ন এবং কূটনৈতিক ও আইনি সমন্বয়ের ওপর বেশি নির্ভর করে। কাজটি উচ্চাভিলাষী, তবে বৈশ্বিক কনসোর্টিয়ামের পক্ষে সম্ভব হতে পারে।

৭. সমাধান করা সমস্যা ও কাজ

7.1. বৈশ্বিক অতিউষ্ণায়ন

তাপদূষণ ও পৃথিবীর জীবমণ্ডলের ওপর চাপ কমাতে শক্তি-নিবিড় শিল্প মহাকাশে সরিয়ে নেওয়া।

7.2. অর্থনৈতিক কাজ

মহাকাশে প্রবেশের খরচ এত কমানো যাতে সৌরশক্তি, গ্রহাণু, চন্দ্রসম্পদ এবং শেষে গ্রহীয় সম্পদ অর্থনৈতিকভাবে ব্যবহারযোগ্য হয়।

7.3. কৌশলগত লক্ষ্য

কক্ষীয় শিল্পায়ন ও গ্রহরক্ষা সমর্থনে দৃঢ়, আবহাওয়া-স্বাধীন উত্তোলন ব্যবস্থা গড়া।

7.4. প্রযুক্তিগত অনুঘটক

প্রকল্পটি পালসড পাওয়ার, অতিপরিবাহিতা, হাইপারসনিক প্রযুক্তি, পারমাণবিক প্রপালশন ও রোবট সুড়ঙ্গ নির্মাণে অগ্রগতি ত্বরান্বিত করবে।

7.5. শক্তি ও তাপীয় স্বনির্ভরতা

স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপশক্তি ব্যবস্থা (স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় ব্যবস্থা) দুটি চাহিদাই একসঙ্গে পূরণ করে। এটি প্রায় 15 GW পর্যন্ত অবিরাম বৈদ্যুতিক শক্তি তৈরি করে, ত্বরকের পুরো চাহিদা মিটিয়ে বাণিজ্যিক উদ্ভূত দেয়; একই সঙ্গে মূল সুড়ঙ্গের চারপাশে পূর্বানুমানযোগ্য শীতল পরিবেশ বজায় রাখে। ফলে গভীর, ভূতাপীয়ভাবে সক্রিয় শিলাস্তরে নির্মাণ ও পরিচালনা সম্ভব হয় এবং অনিরাপদ বাইরের উৎপাদন ও অনিশ্চিত আবহাওয়ার ওপর নির্ভরতা দূর হয়।

7.6. কার্বন পদচিহ্ন

StarRoad সক্রিয় পরিবেশ-সেবার মডেল গ্রহণ করে। প্রকল্পটি বিশ্বের বৃহত্তম স্থির বায়ুমণ্ডলীয় CO₂ ব্যবহারকারী; অতিসংকটাবস্থায় এটি ভূতাপীয় বন্ধ চক্রের স্থায়ী কার্যদ্রব্য। লাখ লাখ টন কার্বন ডাই-অক্সাইড বায়ুমণ্ডলীয় চক্র থেকে সরিয়ে শতাব্দীর জন্য প্রযুক্তিগত চক্রে আবদ্ধ থাকে। এতে StarRoad শক্তিশালী জলবায়ু-প্রকৌশল হাতিয়ার হয়, যা পুরো শিল্পখাতের কার্বন নিঃসরণ সাম্য করতে পারে।

7.7. জলতাপীয় প্রধান খালের সামাজিক ও পরিবেশগত সম্ভাবনা

জলতাপীয় প্রধান খাল শুধু ভূতাপীয় শীতলকরণের অংশ নয়; অঞ্চলকে উপকার দেওয়া দ্বৈত-ব্যবহারের আন্তঃমহাদেশীয় অবকাঠামো:

- **সেচ। মোড়-প্রবেশদ্বার** দিয়ে খালের পানি পথের কৃষিজমিতে সেচ দিয়ে শুষ্ক অঞ্চলকে আফ্রিকার 'সবুজ বলয়'-এ বদলানো যায়।
- **প্রাকৃতিক পুনর্ভরণ**। ঘন নিরক্ষীয় বৃষ্টিতে খাল স্বয়ংক্রিয়ভাবে ভরে।
- **তাপীয় পানির শোধন**। ভূতাপীয় তাপ-বিনিময়ক পানি +60°C পর্যন্ত গরম করার পর তা কার্যত পাস্তুরিত হয় এবং নিরাপদ সেচ, শিল্প ব্যবহার ও ছাঁকনের পর গৃহস্থালি ও পানীয় জলের উপযোগী হয়।
- **মাধ্যাকর্ষণ প্রবাহ**। ভূমির স্বাভাবিক ঢাল—পূর্বে ৩,৪০০ মিটার থেকে পশ্চিমে ০—থাকায় পানি পাম্প ছাড়াই নিজে প্রবাহিত হয় ও বিনা শক্তিতে সঞ্চালন দেয়।
- **ক্ষুদ্র জলবিদ্যুৎ**। উচ্চতার পার্থক্য ধরে ক্ষুদ্র জলবিদ্যুৎ কেন্দ্রের সারি স্থানীয় গ্রিড ও আত্মনির্ভরতার জন্য অতিরিক্ত নবায়নযোগ্য শক্তি তৈরি করতে পারে।

এভাবে StarRoad কেবল পরিবহন নয়, অঞ্চলের টেকসই উন্নয়নে সমন্বিত কৃষি-শক্তি মঞ্চও হয়।

7.8. জ্বালানি নেটওয়ার্ক

স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপ-শক্তি ব্যবস্থা ও কেন্দ্রের নেটওয়ার্ক ত্বরকের পাশাপাশি আশপাশের শহর, শিল্প ও খামারেও উদ্বৃত্ত 'সবুজ' শক্তি দেয়।

7.9. অর্থনৈতিক ধমনী হিসেবে StarRoad

একদিকে StarRoad সৌরজগত উন্নয়নের গ্রহীয় পণ্য গেটওয়ে, অন্যদিকে আফ্রিকার প্রধান অর্থনৈতিক ধমনী ও শিল্পায়ন, জ্বালানি স্বাধীনতা এবং খাদ্যনিরাপত্তার অনুঘটক। এটি ভূগর্ভে কোথাও না-যাওয়া বিচ্ছিন্ন নির্মাণ নয়। পৃষ্ঠের ৪০টি টার্মিনাল, গ্যাবন ও গণতান্ত্রিক কঙ্গো প্রজাতন্ত্রের দুই শিল্পকেন্দ্র, জলতাপীয় প্রধান খাল ও সড়ক নেটওয়ার্ক পশ্চিম থেকে পূর্বে মধ্য আফ্রিকা পেরোনো সরলরৈখিক টেকসই উন্নয়ন গুচ্ছ গড়ে। ২,০৫০ কিমি জুড়ে পরিবেশ-প্রযুক্তি-কৃষির পালাক্রমিক দৃশ্যপট ও স্বয়ংসম্পূর্ণ অর্থনৈতিক অঞ্চল তৈরি হয়, যেখানে:

- ভূতাপ, ক্ষুদ্র জলবিদ্যুৎ ও সৌরশক্তি থেকে বিদ্যুৎ উৎপন্ন হয়;
- সেচনির্ভর কৃষিতে খাদ্য উৎপন্ন হয়;
- শাটল অংশ, সুড়ঙ্গ মডিউল ও সরঞ্জামসহ শিল্পপণ্য তৈরি হয়;
- সড়ক ও রেল পণ্য চলে;
- উৎক্ষেপণ কমপ্লেক্স ও বায়ুমণ্ডলীয় গেটওয়েসহ মহাকাশবন্দর চলে;
- সরাসরি বায়ু-আহরণ কেন্দ্রে বায়ুর CO₂ অপসারিত হয়।

7.10. গুরুত্বপূর্ণ অবকাঠামোর নিরাপত্তা

প্রকল্পের শুরু থেকেই বিপুল হাইড্রোজেন, অতিধ্বনি গতি এবং গিগাওয়াট-স্তরের শক্তি নিরাপদে ব্যবহারের ব্যবস্থা রাখা হয়েছে। নিষ্ক্রিয় সুরক্ষার সঙ্গে সক্রিয় নজরদারি ও স্বয়ংক্রিয় প্রতিক্রিয়া যুক্ত করে বড় শক্তি স্থাপনা ও হাইড্রোজেন ব্যবস্থার জন্য নতুন নিরাপত্তা মান তৈরি করা হয়।

7.11. স্থান নির্বাচন ও সম্প্রসারণক্ষমতা

প্রবেশপথের স্থানকে উচ্চতা, সরবরাহব্যবস্থা, নিরাপত্তা, সম্প্রসারণক্ষমতা ও আইনসহ বহু পরস্পরবিরোধী শর্ত পূরণ করতে হবে। মোহি পর্বত ও পাশের মালভূমি StarRoad-কে ছোট উচ্চভূমির স্থান দিয়ে শুরু করে স্থানান্তর ছাড়াই বিশ্বের বৃহত্তম মহাকাশবন্দরে পরিণত হওয়ার সুযোগ দেয়।

7.12. মহাদেশপারি প্রকল্পের রাজনৈতিক ও আইনি সমন্বয়

তিন দেশের মধ্য দিয়ে পথ যাওয়ার বিষয় CERN ও ITER-এর মতো আন্তর্জাতিক কনসোর্টিয়াম মডেলে সমাধান হবে। ভূতাপীয় স্বয়ংক্রিয় তাপশক্তি ব্যবস্থার ভূগর্ভস্থ অবকাঠামো ও জ্বালানি সম্পদ বিশেষ আইনি মর্যাদা পাবে এবং অংশীদারদের সুবিধা স্পষ্টভাবে ভাগ হবে। প্রকল্পটি রাজনৈতিক স্থিতি ধরে নেওয়া বোঝা নয়; পারস্পরিক নির্ভরতা এবং ভবিষ্যৎ ও নির্মাণকালীন প্রযুক্তিতে অগ্রাধিকারপ্রাপ্ত প্রবেশের মাধ্যমে স্থিতি সৃষ্টি ও রক্ষার নিজস্ব মূল্যবান উপায়।

7.13. পণ্যপ্রবাহের ক্রমবিকাশ

কক্ষীয় শিল্পের সঙ্গে উৎক্ষেপণের হার বাড়ে। মাসে একটি উৎক্ষেপণের অগ্রদূত ধাপ নির্মাণকেন্দ্র তৈরি করে; সপ্তাহে ১-৩টির শিল্প ধাপ সম্পদ গড়ে; দৈনিক উৎক্ষেপণের পরিণত ধাপ মহাকাশ অর্থনীতির সূচকীয় বৃদ্ধি ধরে রাখে।

8. বাজার ও কক্ষীয় রসদ

এই অংশটি StarRoad-এর অর্থনৈতিক সম্ভাব্যতার কেন্দ্রীয় প্রশ্নের উত্তর দেয়: অতি-ভারী উৎক্ষেপণ করিডরকে কাজে লাগানোর মতো বিপুল পরিমাণে কী পাঠানো যাবে? StarRoad বিরল, এককালীন অভিযানের ব্যবস্থা নয়। এর লক্ষ্য পৃথিবী ও উচ্চ কক্ষপথের মধ্যে বৃহৎ, নিয়মিত ও শিল্পভিত্তিক পণ্যপ্রবাহ।

StarRoad-এর প্রধান প্রাথমিক বাজার নিম্ন পৃথিবী কক্ষপথের উপগ্রহমালা বা আলাদা বৈজ্ঞানিক মহাকাশযান নয়; বরং বৃহৎ কক্ষীয় জ্বালানি, গণনামূলক অবকাঠামো, আন্তঃকক্ষীয় রসদ, কক্ষীয় বসতি, মহাকাশযান নির্মাণকেন্দ্র এবং পরবর্তী পৃথিবী-বহির্ভূত শিল্প।

8.1. অতি-ভারী উৎক্ষেপণের চাহিদার সমস্যা

প্রচলিত রকেট অর্থনীতি শুধু প্রতি কিলোগ্রামের খরচে নয়, উৎক্ষেপণের ধরনেও সীমাবদ্ধ: রকেট সহায়ক ভরের বড় অংশ, কক্ষপথে জটিল সংযোজন এবং বহু আলাদা কার্যক্রমসহ পণ্যকে ছোট ছোট চালানো পৌঁছে দেয়। তাই উৎক্ষেপণের দাম কমলেও রকেট পরিবহন অভিযানধর্মী রসদই থেকে যায়।

StarRoad ভিন্ন ধরনের বাজার তৈরি করে। এর উদ্দেশ্য আজকের পেলোড কেবল সম্ভাব্য পাঠানো নয়, বরং রকেট রসদে কখনোই অর্থনৈতিকভাবে সম্ভব নয় এমন পেলোডকে সম্ভব করা।

এর মধ্যে রয়েছে:

- সম্পূর্ণ বা প্রায় সম্পূর্ণ গিগাওয়াট-শ্রেণির মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র;
- বড় কক্ষীয় ডেটা সেন্টার;
- মাইক্রোওয়েভ বিদ্যুৎ-সঞ্চালন মডিউল;
- বড় ট্রাস, রেডিয়েটর, আয়না ও প্যানেল;
- কক্ষীয় মহাকাশযান নির্মাণকেন্দ্র ও স্বয়ংক্রিয় সংযোজন লাইন;
- EML4/5-এর আবাসিক ও শিল্প মডিউল;
- আন্তঃকক্ষীয় টাগ ও পরিবহনযান;
- প্রপেল্যান্ট, বিদ্যুৎ ও সেবা মডিউল;
- ভবিষ্যৎ গ্রহাণু ও আন্তঃগ্রহ অবকাঠামোর উপাদান।

অতএব StarRoad বর্তমান মহাকাশ উৎক্ষেপণ বাজারের ওপর নির্ভরশীল নয়। রেলপথ, কনটেইনার জাহাজ ও বিদ্যুৎ গ্রিড যেমন কেবল বিদ্যমান চাহিদা মেটায়নি, বরং নিজেদের ঘিরে নতুন অর্থনীতি গড়েছে, StarRoad-ও তেমন নতুন বাজার সৃষ্টি করে।

8.2. প্রাথমিক বাজার: মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ ও কক্ষীয় ডেটা সেন্টার

প্রথম ধাপে StarRoad-এর প্রধান বাণিজ্যিক ও কৌশলগত পণ্য হওয়া উচিত গিগাওয়াট-শ্রেণির মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র। এগুলো বড়, সম্পূর্ণ বা আংশিক স্বয়ং-প্রসারণশীল জ্বালানি প্ল্যাটফর্ম, যা AstroLiner-S সরাসরি লক্ষ্য কক্ষপথ বা কার্যস্থলে পৌঁছে দেয়।

মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র একসঙ্গে কয়েকটি প্রয়োজন মেটায়:

- অতি-ভারী উৎক্ষেপণের জন্য বিপুল ও পুনরাবৃত্ত চাহিদা তৈরি করে;
- দিন-রাতের চক্র ও অধিকাংশ আবহাওয়া থেকে স্বাধীন জ্বালানি বাজার গড়ে;
- নতুন উৎপাদনক্ষমতার বড় অংশ পৃথিবীর পৃষ্ঠের বাইরে স্থাপন করতে দেয়;
- কক্ষীয় শিল্পে বিদ্যুৎ সরবরাহের ভিত্তি তৈরি করে;
- কক্ষীয় রসদ, নির্মাণকেন্দ্র ও সেবা-বসতি গড়ার অর্থনৈতিক কারণ সৃষ্টি করে।

পৃথিবীর কক্ষপথে সৌর ধ্রুবক প্রায় ১,৩৬১.৬ W/m^2 । তাই ১ গিগাওয়াট আপতিত সূর্যালোকের জন্য নিখুঁতভাবে মুখ করা সংগ্রাহক ক্ষেত্রফল প্রায় ০.৭৪ km^2 । ২৫-৩৫% ফটোভোল্টাইক দক্ষতা, রূপান্তর ও সঞ্চালন ক্ষতি, কাঠামোগত ফাঁক, রেডিয়েটর, পাওয়ার ইলেকট্রনিক্স, অতিরিক্ত ব্যবস্থা ও অবক্ষয় ধরলে ১ GW ব্যবহারযোগ্য বিদ্যুতের প্রকৃত সংগ্রাহক ক্ষেত্র কয়েক বর্গকিমি হয়। প্রচলিত মহাকাশযানের তুলনায় এটি বড়, কিন্তু StarRoad-এর জন্য স্বাভাবিক; এখানে ভর, ক্ষেত্রফল ও কাঠামোর মাপ প্রধান বাধা থাকে না।

8.2.1. গিগাওয়াট-শ্রেণির মহাকাশ সৌরবিদ্যুতের ভর-তথ্য

গিগাওয়াট-শ্রেণির বিদ্যুৎ কেন্দ্র ছোট উপগ্রহ নয়। আশাবাদী আধুনিক নকশাতেও ২ GW কেন্দ্রের ভর কয়েক হাজার টন। CASSIOPeiA-র মতো হালকা ধারণার আনুমানিক ভর ২,০০০ টন, আর বেশি রক্ষণশীল NASA গবেষণায় সমতুল্য ২ GW ব্যবস্থার ভর ৫,৯০০-১০,০০০ টন।

প্রকল্প / গবেষণা	ক্ষমতা	ভর	StarRoad-এর সঙ্গে প্রাসঙ্গিকতা
CASSIOPeiA / Space Energy Initiative / Frazer-Nash	গ্রিডে সর্বোচ্চ ২ GW	প্রায় ২,০০০ টন	StarRoad-এর সবচেয়ে প্রাসঙ্গিক উদাহরণ: GEO/GSO, ৯৯.৭% উৎপাদন গুণক, একটি উপগ্রহ-একটি রেক্টিফাইং অ্যান্টেনা (রেক্টেনা) বিন্যাস এবং সেরা ক্ষেত্রে প্রায় ১ MW/t সুনির্দিষ্ট ক্ষমতা।
NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm	গ্রিডে ২ GW	প্রায় ৫,৯০০ টন	আরও রক্ষণশীল হিসাব। NASA গ্রিডে ২ GW সরবরাহ ধরে ব্যবস্থা স্বাভাবিকীকরণ করেছে; RD1-এর সৌরপ্যানেল ক্ষেত্র প্রায় ১১.৫ km^2 ।
NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array	গ্রিডে ২ GW, তবে কয়েকটি ব্যবস্থার মাধ্যমে	প্রায় ১০,০০০ টন	NASA প্রায় ১ কোটি কেজি ভর ও ১৯ km^2 সৌরপ্যানেল ক্ষেত্র দিয়েছে। RD2 কম সময় বিদ্যুৎ উৎপাদন করে, তাই একটি RD1-এর প্রায় সমান শক্তির জন্য পাঁচটি RD2 দরকার।
JAXA / Sasaki Tethered-SPS	গড় ০.৭৫ GW / সর্বোচ্চ ১.২ GW	প্রতি ব্যবস্থায় প্রায় ২০,০০০ টন	ভারী উদাহরণ। গড় ২ GW-এ মোটামুটি স্কেল করলে প্রায় ৫০,০০০+ টন হয়; ফলে এটি একটি উৎক্ষেপণ নয়, একাধিক যাত্রা ও কক্ষীয় সংযোজন।
Caltech SSPP / হালকা মডিউলার টাইল	সম্পূর্ণ ২ GW কেন্দ্র নয়, প্রযুক্তির একটি একক	শুধু সক্রিয় স্তরই পৃথিবীতে ২ GW সরবরাহে তাত্ত্বিকভাবে প্রায় ১,৭০০-৩,৮০০ টন	১৬০ g/m^2 এবং ৭-১৪% প্রান্ত-থেকে-প্রান্ত দক্ষতার এই হিসাব কেবল সক্রিয় স্তরের। পূর্ণ কেন্দ্রের জন্য কাঠামো, বিদ্যুৎ সঞ্চালন, দিকনিয়ন্ত্রণ, রেডিয়েটর, তার, ইলেকট্রনিক্স, রক্ষণাবেক্ষণ ব্যবস্থা ও মজুতও দরকার।

সারণির কেন্দ্রীয় সিদ্ধান্ত: ২,০০০-১০,০০০ টন ওজনের ২ GW মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র AstroLiner-এর কাজের সঙ্গে প্রায় নিখুঁতভাবে মেলে। StarRoad-এ এটি একটি অতি-ভারী উৎক্ষেপণ বা সামান্য কক্ষীয় সংযোজনসহ সীমিত কয়েকটি যাত্রা। রকেট রসদে কয়েক দশক বা শত শত অতি-ভারী রকেট উৎক্ষেপণ, পুনরায় জ্বালানি ভরার শৃঙ্খল, কক্ষীয় সংযোজন, GEO বা EML পর্যন্ত টেনে নেওয়া এবং অনেক বেশি পরিচালন জটিলতা দরকার।

8.2.2. একটি ২ GW মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্রের শক্তি উৎপাদন

মূল অনুমান:

- গ্রিডে সরবরাহ: ২ GW;

○ প্রাপ্যতা / উৎপাদন গুণক: ৯৯.৭%;

○ নকশাগত আয়ু: ৩০ বছর;

একটি কেন্দ্র উৎপাদন করে:

○ বছরে প্রায় ১৭.৪৭ TWh;

○ ৩০ বছরে প্রায় ৫২৪ TWh।

এতে প্রতি কেজির পরিবহন খরচ মৌলিকভাবে গুরুত্বপূর্ণ হয়। রকেট রসদে উৎক্ষেপণই প্রধান বাধা; StarRoad-এ পরিবহন অংশ দ্রুত ভবিষ্যৎ বিদ্যুতের দামের সামান্য অংশে নেমে আসে।

8.2.3. মহাকাশ সৌরবিদ্যুতের খরচে পরিবহন অংশ

নিচের হিসাব কেবল সমতলীকৃত বিদ্যুৎ খরচের পরিবহন অংশ: কেন্দ্রের ভর পৌঁছানোর খরচকে ৩০ বছরের মোট উৎপাদন দিয়ে ভাগ করা। কেন্দ্র নির্মাণ, রেক্টেনা, রক্ষণাবেক্ষণ, বিমা, মডিউল বদল, ভূমি অবকাঠামো ও পরিচালকের মুনাফা এতে নেই।

সূত্র:

LCOE-এর পরিবহন অংশ = কেন্দ্রের ভর × সরবরাহ খরচ / আয়ুষ্কালের মোট বিদ্যুৎ উৎপাদন

৯৯.৭% প্রাপ্যতা ও ৩০ বছরের আয়ুর ২ GW কেন্দ্রের মোট উৎপাদন প্রায় ৫২৪ বিলিয়ন kWh।

ধাপ / পরিবহন ব্যবস্থা	সরবরাহ খরচ	CASSIOPEIA-সদৃশ কেন্দ্র, ২,০০০ টন, €/kWh	NASA RD1, ৫,৯০০ টন, €/kWh	NASA RD2, ১০,০০০ টন, €/kWh
বর্তমান রকেট রসদ, GTO-র নিম্নতর মান	\$3,600– 5,600/kg	1,37–2,14	4,05–6,31	6,87–10,69
StarRoad, বছর ১–২	\$80–120/kg	0,0305–0,0458	0,0901–0,1351	0,1527–0,2290
StarRoad, বছর ৩–৫	\$30–50/kg	0,0114–0,0191	0,0338–0,0563	0,0572–0,0954
StarRoad, বছর ৬–১০	\$10–20/kg	0,0038–0,0076	0,0113–0,0225	0,0191–0,0382
StarRoad, বছর ১১–১৫	\$3–8/kg	0,0011–0,0031	0,0034–0,0090	0,0057–0,0153
StarRoad, বছর ১৬–২৫	\$0.8–3/kg	0,0003–0,0011	0,0009–0,0034	0,0015–0,0057
StarRoad, বছর ২৬+	\$0.3–1/kg	0,0001–0,0004	0,0003–0,0011	0,0006–0,0019

তুলনায় আধুনিক নতুন স্থলভিত্তিক উৎপাদনের LCOE প্রতি kWh-এ কয়েক সেন্ট: স্থলভাগের বায়ুবিদ্যুৎ প্রায় ৩–৪ €/kWh, বৃহৎ সৌরবিদ্যুৎ ৪–৫ €/kWh এবং জলবিদ্যুৎ ৫–৬ €/kWh। ২০৫০ সালের স্থলভিত্তিক বিকল্পের NASA হিসাব প্রায় ২–৫ €/kWh।

গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত হলো, পরীক্ষামূলক সময়েও মহাকাশ সৌরবিদ্যুতের StarRoad পরিবহন অংশ স্থলভিত্তিক LCOE-এর চেয়ে এক ধাপ কম; পরিণত পর্যায়ে এটি প্রধান মূল্য উপাদান হিসেবে প্রায় অদৃশ্য হয়। এর অর্থ মোট খরচ সেন্টের সহস্রাংশ হবে না। কেন্দ্র ও রেক্টেনা নির্মাণ, সেবা, ইলেকট্রনিক্স, রেডিয়েটর, মডিউল বদল, বিমা ও মুনাফা থাকবে। StarRoad সেই নির্দিষ্ট পরিবহন বাধাটি সরায়, যা রকেট রসদে মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎকে ব্যয়বহুল করে।

আজকের রকেট দৃশ্যপটে বাস্তব অবস্থা \$3,600–5,600/kg সংখ্যাটির চেয়েও খারাপ। বড় কেন্দ্রকে কক্ষপথে তোলার পাশাপাশি কার্যস্থলে নিতে, জুড়তে ও রক্ষণাবেক্ষণ করতে হয়; টাঙ্গে জ্বালানি ভরতে এবং অবকাঠামো সচল রাখতে হয়। তাই NASA-র ভিত্তি LCOE RD1-এর জন্য প্রায় ৬১ €/kWh এবং RD2-এর জন্য ১৫৯ €/kWh। StarRoad কেবল উৎক্ষেপণ খরচ কমায় না; হাজার হাজার রকেট কার্যক্রমকে একটি বা কয়েকটি অতি-ভারী অবকাঠামো যাত্রায় বদলে সমস্যার শ্রেণিই পাল্টায়।

8.2.4. দ্বিতীয় প্রাথমিক বাজার হিসেবে কক্ষীয় ডেটা সেন্টার

কক্ষীয় ডেটা সেন্টার দ্বিতীয় প্রাথমিক বাজার হতে পারে। কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তা, ক্লাউড কম্পিউটিং ও ডিজিটাল অবকাঠামোর বৃদ্ধিতে ডেটা সেন্টার বৈশ্বিক জ্বালানি চাহিদার গুরুত্বপূর্ণ অংশ। IEA-র হিসাবে তারা ইতিমধ্যে বছরে শত শত TWh ব্যবহার করে এবং পরবর্তী দশকে বছরে প্রায় ১,০০০ TWh-এ পৌঁছাতে পারে।

গণনা অবকাঠামোর অংশ মহাকাশ সৌরকেন্দ্রের কাছে রাখার সুবিধা:

- নিরবচ্ছিন্ন কক্ষীয় উৎপাদনে সরাসরি প্রবেশ;
- স্থল বিদ্যুৎ গ্রিডে কম চাপ;
- শূন্যতায় বড় রেডিয়েটর ক্ষেত্র নির্মাণ;
- ভূমি, পানি ও গ্রিড ক্ষমতার স্থানীয় সীমায় কম নির্ভরতা;
- সৌরকেন্দ্রের সঙ্গে জ্বালানি, যোগাযোগ ও সেবা অবকাঠামো ভাগ করা।

প্রথম ধাপে কক্ষীয় বিদ্যুৎ কেন্দ্র ও ডেটা সেন্টারকে আলাদা প্ল্যাটফর্ম বা সম্মিলিত জ্বালানি-গণনা কমপ্লেক্স হিসেবে পাঠানো যায়, যাতে সৌরকেন্দ্র, পাওয়ার ইলেকট্রনিক্স, রেডিয়েটর, কম্পিউটিং মডিউল, যোগাযোগ অ্যান্টেনা ও মাইক্রোওয়েভ সঞ্চালন সার্কিট থাকবে।

8.3. মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুতের জলবায়ু ও শিল্পগত যুক্তি

মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্রকে কেবল ‘সবুজ’ প্রযুক্তি বলা ঠিক নয়। এর ভূমিকা আরও বিস্তৃত: আরাম কমিয়ে বা ভোগের সীমা চাপিয়ে নয়, আরও শক্তিশালী শক্তিব্যবস্থা গড়ে এটি কার্বনভিত্তিক উৎপাদন প্রতিস্থাপন করতে পারে।

প্রচলিত জলবায়ু নীতিকে প্রায়ই এমনভাবে দেখা হয় যেন নিঃসরণ কমাতে সমাজকে স্বাচ্ছন্দ্য ত্যাগ করতে হবে। StarRoad অন্য পথ দেয়: সভ্যতার সক্ষমতা কমানোর বদলে নতুন উৎপাদনের বেশির ভাগ মহাকাশে স্থাপন করা এবং বিদ্যুৎ খাতের কার্বন নিঃসরণ না বাড়িয়ে প্রাপ্য শক্তি বাড়ানো।

এই মডেলে শিল্প-সম্পদ হিসেবে হাইড্রোকার্বন বিলুপ্ত করার প্রয়োজন নেই। ব্যাপক বিদ্যুৎ ও তাপ উৎপাদন থেকে ধীরে ধীরে সরিয়ে এগুলোকে রাসায়নিক, উপকরণ, কার্বন কম্পোজিট, কৃত্রিম পণ্য এবং যেখানে কার্বন জ্বালানি নয় কাঁচামাল—এমন উৎপাদন শৃঙ্খলে রাখা যায়।

আজকের কার্বন-শক্তি শিল্পের জন্য এটি কেবল হুমকি নয়, রূপান্তরের পথও। তেল, গ্যাস ও কয়লা অবকাঠামোর সঙ্গে যুক্ত কোম্পানি, রাষ্ট্র ও তহবিলকে মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ, কক্ষীয় শক্তি, হাইড্রোকার্বন রসায়ন ও কার্বন উপকরণে অগ্রাধিকার বিনিয়োগের সুযোগ দেওয়া যায়। তখন StarRoad প্রতিষ্ঠিত শক্তি শিল্পের শুধু প্রতিদ্বন্দ্বী নয়, নিয়ন্ত্রিত রূপান্তরের মাধ্যম হবে।

8.3.1. শক্তি প্রতিস্থাপনের পরিসর

এক গিগাওয়াট অবিরাম বৈদ্যুতিক ক্ষমতা বছরে প্রায় 8.76 TWh শক্তি দেয়। 99.7% প্রাপ্যতায় চলা 2 GW মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র বছরে প্রায় 17.47 TWh উৎপাদন করে।

অতএব:

- 100 GW কক্ষীয় উৎপাদন বছরে প্রায় 876 TWh দেয়;
- 1 TW কক্ষীয় উৎপাদন বছরে প্রায় 8,760 TWh দেয়;
- 3 TW কক্ষীয় উৎপাদন বছরে প্রায় 26,280 TWh দেয়, যা বর্তমান বৈশ্বিক বার্ষিক বিদ্যুৎ ব্যবহারের কাছাকাছি।

২০২৪ সালে বিশ্বে প্রায় 30.8 হাজার TWh বিদ্যুৎ উৎপাদিত হয়, যার মধ্যে জীবাশ্ম উৎসের অবদান প্রায় 18.2 হাজার TWh। পরিসরটি স্পষ্ট: কার্বনভিত্তিক উৎপাদনের আংশিক প্রতিস্থাপনেও দশ নয়, শত বা হাজার গিগাওয়াট নতুন নির্ভরযোগ্য ক্ষমতা দরকার।

8.3.2. StarRoad উৎক্ষেপণে মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র বহন করলে সম্ভাব্য প্রতিস্থাপন হার

সারণিটি একটি উর্ধ্বসীমার কারিগরি হিসাব দেয়: StarRoad-এর উৎক্ষেপণের বড় অংশ যদি প্রতিবার গ্রিড-সংযুক্ত একটি 2 GW কেন্দ্র বহন করে, তবে কী হতে পারে। এটি পূর্বাভাস বা প্রতিশ্রুতি নয়। কেবল আরও কিছু শর্ত—ধারাবাহিক উৎপাদন, সম্পূর্ণ রেটেনা ও গ্রিড সংযোগ, রাজনৈতিক ও আইনি গ্রহণযোগ্যতা, অর্থায়ন, রক্ষণাবেক্ষণ এবং উৎপাদন গ্রহণে সক্ষম শক্তিবাজার—পূরণ হলে সম্ভাব্য হারটি বোঝায়।

StarRoad পরিচালনার সময়কাল	অর্থনৈতিক মডেলে বছরে উৎক্ষেপণ	বছরে নতুন মহাকাশ-সৌর ক্ষমতা	স্থাপনের পর নতুন বার্ষিক উৎপাদন	২০২৪ সালে জীবাশ্ম-জ্বালানি বিদ্যুৎ উৎপাদন, ≈ 18.2 হাজার টেরাওয়াট-ঘণ্টা/বছর	২০২৪ সালে মোট বিশ্ব বিদ্যুৎ উৎপাদন, ≈ 30.8 হাজার টেরাওয়াট-ঘণ্টা/বছর
বছর ১-২	12-24	24-48 GW/বছর	210-419 TWh/বছর	1,2-2,3%	0,7-1,4%
বছর ৩-৫	50-100	100-200 GW/বছর	873-1,747 TWh/বছর	4,8-9,6%	2,8-5,7%
বছর ৬-১০	200-300	400-600 GW/বছর	3,493-5,240 TWh/বছর	19-29%	11-17%
বছর ১১-১৫	500-700	1,000-1,400 GW/বছর	8,734-12,227 TWh/বছর	48-67%	28-40%
বছর ১৬-২৫	1000+	2,000+ GW/বছর	17,467+ TWh/বছর	96%+	57%+
বছর ২৬+	1500+	3,000+ GW/বছর	26,201+ TWh/বছর	144%+	85%+

সারণিটি দেখায় কেন মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ StarRoad-এর স্বাভাবিক প্রধান বাজার। প্রতি উৎক্ষেপণে একটি 2 GW কেন্দ্র হলে প্রাথমিক পরিচালনাতেই উল্লেখযোগ্য শক্তিপ্রবাহ তৈরি হয়; পূর্ণাঙ্গ পরিচালনা গ্রহব্যাপী হাতিয়ার হয়ে ওঠে।

সারণিটিকে নিশ্চিত কার্বনমুক্তির সময়সূচি ভাবা যাবে না। বাস্তব প্রতিস্থাপন শুধু StarRoad-এর উৎক্ষেপণক্ষমতা নয়, আরও যেসব বিষয়ে সীমিত হবে:

- মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র তৈরির হার;
- পাওয়ার ইলেকট্রনিকস, রেডিয়েটর, ট্রান্স, মাইক্রোওয়েভ প্রেরক ও নিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থা উৎপাদন;
- ভূমিভিত্তিক রেক্টেনা নির্মাণ;
- বিদ্যুৎ গ্রিডের ক্ষমতা;
- মাইক্রোওয়েভে শক্তি পাঠানোর রাজনৈতিক অনুমোদন;
- সুবিধা ও ঝুঁকির আন্তর্জাতিক বণ্টন;
- কক্ষীয় শক্তির বীমা ও নিয়ন্ত্রণ;
- কেন্দ্রের রক্ষণাবেক্ষণ, মেরামত ও আয়ু শেষে অপসারণ;
- ভূমিভিত্তিক সৌর, বায়ু, পারমাণবিক, জলবিদ্যুৎ ও ভূতাপীয় শক্তির প্রতিযোগিতা।

তাই সঠিক বক্তব্য হলো: StarRoad বৈশ্বিক জীবাশ্ম বিদ্যুতের পরিসরের সমতুল্য প্রতিস্থাপন হারকে কারিগরিভাবে সম্ভব করে, কিন্তু প্রকৃত রূপান্তরের গতি নির্ধারণ করবে কেন্দ্র উৎপাদন, গ্রিড, রেক্টেনা, নীতি ও বাজার।

8.3.3. কার্বনভিত্তিক শক্তির শিল্পগত রূপান্তর

কেন্দ্র উৎপাদন StarRoad উৎক্ষেপণের গতির সঙ্গে মিললে এক বা দুই দশকে টেরাওয়াট-স্তরের কক্ষীয় শক্তি গড়ে উঠতে পারে। এতে ভূমিভিত্তিক শক্তি বিলুপ্ত হবে না, ভূমিকা বদলাবে: স্থল গ্রিড, পারমাণবিক, জলবিদ্যুৎ, নবায়নযোগ্য, ভূতাপীয় কেন্দ্র ও সঞ্চয়ন মিলে সংকর ব্যবস্থা গড়বে, যেখানে কক্ষীয় উৎপাদন ভিত্তিভার, শিল্প ও রপ্তানি স্তরে শক্তি দেবে।

এই পরিস্থিতিতে কার্বনভিত্তিক শক্তি শুধু 'হারে' না; রূপান্তরের পথ পায়:

- কয়লা ও গ্যাস বিদ্যুৎকেন্দ্র ধীরে ধীরে ভিত্তিভার উৎপাদন থেকে সরে যায়;
- গ্যাস অবকাঠামোর একাংশ সংরক্ষিত, রাসায়নিক ও কৃত্রিম-পণ্য ভূমিকায় যায়;
- তেল ও গ্যাস কোম্পানি মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ, রেক্টেনা, হাইড্রোকার্বন রসায়ন ও কার্বন উপকরণে বিনিয়োগ করে;
- কয়লা শিল্প কার্বন কম্পোজিট, বিজারক, রাসায়নিক কাঁচামাল ও উপকরণে যেতে পারে;
- কিছু প্রতিষ্ঠিত শক্তি কোম্পানি কক্ষীয় উৎপাদন, রেক্টেনা ও গ্রিড বিতরণের পরিচালকে পরিণত হয়।

মূল রাজনৈতিক ও অর্থনৈতিক কথা শক্তিশালী শিল্পকে তাৎক্ষণিকভাবে নিজেদের ধ্বংস করতে বলা নয়, বরং রূপান্তরের পথ দেওয়া। মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ ও রাসায়নিক উৎপাদনের মাধ্যমে কার্বন-শক্তি খাত লাভ ধরে রাখতে বা বাড়াতে পারলে রূপান্তরের বিরোধিতা অনেক কমতে পারে।

8.3.4. প্রচলিত ‘সবুজ কর্মসূচি’ থেকে এটি কীভাবে আলাদা

StarRoad শক্তি সম্প্রসারণের প্রস্তাব দেয়, শক্তি-সংযমের নয়। এর জলবায়ু যুক্তি সভ্যতার সক্ষমতা কমানো নয়, সেই সক্ষমতা আরও টেকসই অবকাঠামোতে নেওয়া।

এটি সেইসব পন্থা থেকে আলাদা, যেগুলোকে মানুষ ‘জলবায়ুর জন্য খারাপভাবে বাঁচার’ দাবি বলে মনে করে। StarRoad-এর সঙ্গে মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ ভিন্ন দৃষ্টিভঙ্গি দেয়:

- কম নয়, বেশি শক্তি;
- কম নিঃসরণ, কম শিল্প নয়;
- ডিজিটাল অর্থনীতিতে সীমা নয়, আরও প্রাপ্য কম্পিউটিং ক্ষমতা;
- পরিবহন, উৎপাদন ও দৈনন্দিন জীবনে আরও বিদ্যুতায়ন;
- উন্নয়নশীল অঞ্চলের জন্য আরও সুযোগ;
- জ্বালানি হিসেবে জীবাশ্ম সম্পদের ওপর কম নির্ভরতা, কিন্তু শিল্পের কাঁচামাল হিসেবে কার্বন বজায় রাখা।

এই দৃষ্টিভঙ্গি StarRoad-এর সভ্যতাগত যুক্তির সঙ্গে বেশি সামঞ্জস্যপূর্ণ: প্রকল্পটি মানবজাতিকে সংকুচিত হতে বলে না; এটি এমন অবকাঠামো গড়ে যা আগের কার্বন পদচিহ্ন ছাড়াই বিকাশ সম্ভব করে।

8.3.5. উপসংহার: প্রধান বাজার হিসেবে মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ

গিগাওয়াট-স্তরের মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র StarRoad-এর গৌণ ব্যবহার নয়; এগুলো তার অর্থনৈতিক প্রয়োজনীয়তার অন্যতম কেন্দ্রীয় কারণ।

দুটো একসঙ্গে:

- অতি-ভারী উৎক্ষেপণের ব্যাপক চাহিদা তৈরি করে;
- শক্তি বিক্রি থেকে স্পষ্ট বাণিজ্যিক আয় দেয়;
- ভবিষ্যতের কক্ষীয় শিল্পভিত্তিকে শক্তি দেয়;
- রেক্টেনা, রিলে, টাগ, মহাকাশযান নির্মাণাগার ও পরিষেবা বসতির চাহিদা তৈরি করে;
- কার্বনভিত্তিক শক্তি শিল্পকে নতুন বিনিয়োগ ক্ষেত্র দেয়;
- গ্রহব্যাপী জলবায়ু পদক্ষেপের বাস্তব ব্যবস্থা দেয়।

রকেট-নির্ভর সরবরাহে মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র অতিরিক্ত ভারী, ব্যয়বহুল ও পরিচালনাগতভাবে জটিল থাকে। StarRoad-এর সরবরাহব্যবস্থায় এগুলো স্বাভাবিক ধারাবাহিক পণ্যে পরিণত হয়—ব্যতিক্রমী অভিযান নয়, বৃহৎ অবকাঠামো শিল্পের শক্তিপণ্য।

8.4. কক্ষীয় অবস্থান: GEO ও EML4/5

মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র ও সংশ্লিষ্ট অবকাঠামোর প্রধান স্থান হলো ভূস্থির কক্ষপথ এবং পৃথিবী-চাঁদ ব্যবস্থার লাগরাঞ্জ বিন্দু EML4/5।

ভূস্থির কক্ষপথ পৃথিবীর নির্দিষ্ট অঞ্চলে বিদ্যুৎ পাঠানোর উপযোগী। GEO-র উপগ্রহ বা জ্বালানি প্ল্যাটফর্ম পৃষ্ঠের তুলনায় প্রায় একই স্থানে থাকে, ফলে মাইক্রোওয়েভ রশ্মি লক্ষ্য করা, স্থল রেক্টেনার স্থান নির্বাচন ও আঞ্চলিক গ্রিডে সংযোগ সহজ হয়। বিষুবরেখার ওপর ভূস্থির কক্ষপথের উচ্চতা প্রায় ৩৫,৮০০ কিমি।

EML4 ও EML5 বড় বসতি, নির্মাণকেন্দ্র, শিল্পকেন্দ্র ও জ্বালানি গুচ্ছের উপযোগী। পৃথিবী-চাঁদ ব্যবস্থায় তারা সমবাহু ত্রিভুজের শীর্ষে এবং সরলরেখার L1/L2-এর চেয়ে দীর্ঘমেয়াদে বেশি স্থিতিশীল। তাই অবস্থান ধরে রাখতে বিপুল প্রপেল্যান্ট ব্যয় না করেই সেখানে বড় কেন্দ্র, গুদাম, নির্মাণকেন্দ্র, সংযোজন ট্রাস ও আবাসিক কমপ্লেক্স রাখা যায়।

GEO ও EML4/5 ব্যবহার করলে নিম্ন কক্ষপথের সঙ্গে সংঘাতও কমে। সৌরকেন্দ্রের মতো বড় প্ল্যাটফর্মকে LEO-তে বিশাল অ্যারে বসাতে হয় না, যেখানে আলোকদূষণ, সংঘর্ষঝুঁকি, অবশিষ্ট বায়ুর টান ও জ্যোতির্বিজ্ঞানে ব্যাঘাত ঘটত। নিম্ন কক্ষপথ ক্যাপসুল অবতরণ, মধ্যবর্তী কাজ, পরিদর্শন ও বিশেষ নিম্ন-কক্ষীয় কাজের সেবা এলাকা থাকে।

8.5. প্রথম ধাপ: AstroLiner-S-এর সরাসরি যাত্রা

প্রথম ধাপে প্রারম্ভিক, সরলীকৃত ও কম ঝুঁকির শাটল AstroLiner-S ব্যবহৃত হবে। এতে পারমাণবিক বিভাজন বা সংযোজন শক্তির উৎস থাকবে না; চূড়ান্ত কক্ষপথে প্রবেশ, সংশোধন, কক্ষপথ ত্যাগ ও প্রত্যাবর্তনে রাসায়নিক প্রপালশন ব্যবহৃত হবে।

মূল লক্ষ্য সমস্ত কক্ষীয় অবকাঠামো পরিণত হওয়ার অপেক্ষা না করে প্রথম পণ্যপ্রবাহ তৈরি করা। তাই AstroLiner-S বড় মডিউল সরাসরি পৌঁছাতে পারবে:

- সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র ও জ্বালানি রিলে স্থাপনের জন্য ভূস্থির কক্ষপথে;
- EML4/5 জ্বালানি গুচ্ছে;
- সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র ও ডেটা সেন্টার স্থাপনের জন্য উচ্চ-শক্তির কক্ষপথে।

এই ধাপের পণ্য প্রধানত সম্পূর্ণ বা প্রায় সম্পূর্ণ কাঠামো:

- স্বয়ং-প্রসারণশীল মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র;
- বিদ্যুৎ সঞ্চালন মডিউল;
- বড় রেডিয়েটর প্যানেল;
- ডেটা সেন্টারের গণনা ব্লক;
- ট্রাস কাঠামো;
- রোবট সংযোজক;
- প্রাথমিক সেবা স্টেশন;
- প্রপেল্যান্ট ও কার্যকর তরলের মজুত;
- যোগাযোগ, নেভিগেশন ও যান-নিয়ন্ত্রণ মডিউল।

LEO-র তুলনায় EML4/5 ও GEO-র সুবিধা:

- নিম্ন-কক্ষীয় উপগ্রহের আলোকদূষণ নেই।
- নিয়মিত দিন-রাত চক্র ছাড়া সৌরকেন্দ্রে প্রায় নিরবচ্ছিন্ন আলো।
- পৃথিবী ও চাঁদের তুলনায় স্থিতিশীল অবস্থান।

ধাপটির প্রধান সংখ্যা:

- উৎক্ষেপণের হার: মাসে ১-২টি, বছরে ১২-২৪টি।
- প্রতি যাত্রায় পেলোড: ১০,০০০ টন।
- বার্ষিক পণ্যপ্রবাহ: ১২০,০০০-২৪০,০০০ টন।
- সরবরাহ খরচ: \$80-120/kg।
- লক্ষ্য কক্ষপথ: EML4/5 ও GEO।

এই পদ্ধতিতে আয় শুরু হওয়ার আগে পুরো মহাকাশ অবকাঠামো নির্মাণের ফাঁদ এড়ানো যায়। প্রথম বাণিজ্যিক পেলোডগুলোই ভবিষ্যৎ অবকাঠামোর উপাদান।

8.6. পরিণত ধাপ: মাইক্রোওয়েভ রিলে ও সেবা অবকাঠামো

বিদ্যুৎ কেন্দ্র, ডেটা সেন্টার ও বড় প্ল্যাটফর্মের সংখ্যা কক্ষীয় নেটওয়ার্ককে অবিরাম চালানোর মতো হলে পরিণত ধাপ শুরু হয়। কাজ তখন নতুন কেন্দ্র উৎক্ষেপণ থেকে ইতিমধ্যে স্থাপিত কেন্দ্রগুলোর সেবায় বিস্তৃত হয়।

পরিণত ধাপের প্রধান উপাদান:

- GEO-তে মাইক্রোওয়েভ রিলে নেটওয়ার্ক;
- প্রধান জ্বালানি গুচ্ছের কাছে স্থায়ী সেবা কেন্দ্র;
- মেরামত ও পরিদর্শনযান;
- সংরক্ষণ স্টেশন;
- কক্ষীয় টাগ;
- EML4/5-এ প্রথম স্থায়ী বসতি ও পালাক্রমিক কর্মীদল;
- স্বয়ংক্রিয় ও আধা-স্বয়ংক্রিয় মহাকাশযান নির্মাণকেন্দ্র;
- EML1 পরিবহন কেন্দ্র।

মাইক্রোওয়েভ রিলে পৃথিবীর অঞ্চলগুলোর মধ্যে জ্বালানি আরও নমনীয়ভাবে বণ্টন, কেন্দ্র-থেকে-রেস্টেনার সরাসরি জ্যামিতির ওপর নির্ভরতা কমানো এবং বিচ্ছিন্ন কক্ষীয় কেন্দ্রের বদলে একটি জ্বালানি নেটওয়ার্ক গড়া সম্ভব করে। ভূমিতে গ্রহণকারী রেস্টেনা, রূপান্তর উপকেন্দ্র, অন্তর্বর্তী সংরক্ষণ ও আঞ্চলিক গ্রিড-সংযোগ লাগবে।

স্থায়ী সেবা সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্রের আয়ু বাড়ায়। সেবা না থাকলে অর্থনীতি আলাদা মডিউলের আয়ুতে বাঁধা থাকে। প্যানেল, প্রেরক, রেডিওটর, ইলেকট্রনিক্স ও ট্রাস কক্ষপথে বদলানো গেলে কেন্দ্রগুলো একবার-ব্যবহারযোগ্য উপগ্রহ নয়, রক্ষণাবেক্ষণযোগ্য জ্বালানি স্থাপনা হয়।

8.7. পরিচালন পরিবেশ অনুযায়ী পরিবহন বিভাজন

পরিণত StarRoad রসদ একটি সর্বজনীন মহাকাশযান নয়, পরিবেশ অনুযায়ী পরিবহন কাজ ভাগ করার ওপর দাঁড়ায়।

AstroLiner পৃথিবী থেকে কক্ষপথ এবং কক্ষপথ থেকে পৃথিবীতে পরিবহন করে। এটি কক্ষীয় ভারী উত্তোলনযান, প্রত্যাবর্তন গ্লাইডার ও ভারী কনটেইনারবাহী যান, তবে সর্বজনীন আন্তঃগ্রহ মহাকাশযান হওয়া উচিত নয়।

আন্তঃকক্ষীয় পরিবহনযান শুধু মহাকাশে চলে। বায়ুমণ্ডলে প্রবেশ করে না বলে অবতরণের তাপঢাল, ডানা, সামুদ্রিক ব্যবস্থা বা জল-অবতরণের শক্তিশালী কাঠামো বহন করে না। কক্ষীয় কেন্দ্রের মধ্যে চলাচলের জন্য অনুকূলিত হওয়ায় তাদের শুষ্ক ভর কম ও আয়ু বেশি।

বিশেষ ক্যাপসুল গ্রহে নেমে মানুষ বা পণ্যকে পৃষ্ঠে ফেরায়। এগুলো AstroLiner-এর মূল কাঠামোর অংশ হওয়া উচিত নয়; অল্প মানুষ বা পণ্য নামাতে হাজার হাজার টন নামানো অযৌক্তিক।

পরিবহন স্তরবিন্যাস:

পরিবেশ	প্রধান যান	কাজ
পৃথিবী → কক্ষপথ	AstroLiner / AstroLiner-S	পণ্য ও মডিউলের অতি-ভারী উত্তোলন
উচ্চ কক্ষপথ ও L-বিন্দু	আন্তঃকক্ষীয় পরিবহনযান ও টাগ	LEO, GEO ও EML1/2/4/5-এর মধ্যে পরিবহন
কক্ষপথ → পৃষ্ঠ	যাত্রী ও পণ্য ক্যাপসুল	মানুষ ও পণ্যের অবতরণ
কক্ষীয় কেন্দ্র	স্টেশন, গুদাম ও নির্মাণকেন্দ্র	সংরক্ষণ, সংযোজন, মেরামত ও স্থানান্তর

এই বিভাজন প্রতিটি যানশ্রেণির শুষ্ক ভর ও আপস কন্ট্রোল এবং মহাকাশ রসদকে কনটেইনারবাহী জাহাজ, টাগ, বন্দর, গুদাম, নির্মাণকেন্দ্র ও বিশেষায়িত জাহাজের সামুদ্রিক পরিবহনের কাছাকাছি আনে।

8.8. পরিণত রসদে AstroLiner-এর ভূমিকা

AstroLiner সর্বজনীন মহাকাশযান নয়। এর প্রধান ভূমিকা পুনরাবৃত্ত অতি-ভারী উত্তোলনযান এবং পুনর্ব্যবহারযোগ্য প্রত্যাবর্তন পরিবহন।

উর্ধ্বমুখী যাত্রায় বহন করে:

- পণ্য কনটেইনার;
- যাত্রী মডিউল;
- প্রপেল্যান্ট মডিউল;
- নির্মাণ উপাদান;

- প্যানেল, ট্রাস, কেবল ও রেডিয়েটর;
- সম্পূর্ণ বা খণ্ডিত আন্তঃকক্ষীয় টাগ;
- অবতরণ ক্যাপসুল;
- কক্ষীয় স্টেশন মডিউল;
- বিদ্যুৎ কেন্দ্র ও ডেটা সেন্টারের উপাদান।

প্রত্যাবর্তনে প্রধানত খালি থাকে বা সীমিত পণ্য বহন করে:

- কর্মীদল;
- নমুনা;
- দামি মেরামতযোগ্য সংযোজিত যন্ত্রাংশ;
- অবসৃত ইলেকট্রনিক্স;
- নষ্ট বা খুলে নেওয়া অংশ।

প্রত্যাবর্তন বিন্যাস যতটা সম্ভব হালকা হতে হবে। নিরাপদ গ্লাইড, বায়ুমণ্ডলীয় প্রবেশ ও জল-অবতরণে অবশিষ্ট ভর সর্বনিম্ন দরকার, তাই মিশন শেষে AstroLiner-এর প্রত্যাবর্তন ভর উৎক্ষেপণ ভরের চেয়ে অনেক কম হতে হবে। হাজার হাজার টন পেলোড পৃথিবীতে ফেরানো নিয়মিত কাজ নয়; বিশেষ ক্যাপসুল বা আলাদা প্রত্যাবর্তন মডিউল তা করবে।

চার কারণে AstroLiner সীমিত নিজস্ব ডেল্টা-ভি রাখে:

1. এখনও অসম্পূর্ণ অবকাঠামো থেকে স্বাধীনতা;
2. বিকল্প পথ ব্যবহারের ক্ষমতা;
3. জরুরি পরিস্থিতি;
4. প্রাথমিক পরিচালনায় নমনীয়তা।

তবে পরিণত ব্যবস্থায় বিশেষ টাগ ও পরিবহনযান আন্তঃকক্ষীয় ডেল্টা-ভির অধিকাংশ দেয়। এতে AstroLiner-এর ওপর চাহিদা কমে, কাঠামোর আয়ু বাড়ে এবং উৎক্ষেপণ-খালাস-প্রত্যাবর্তন-সেবা-পুনরায় উৎক্ষেপণ চক্র ছোট হয়।

8.9. আন্তঃকক্ষীয় পরিবহনযান ও টাগ

এগুলো StarRoad-এর স্থায়ী মহাকাশ বহর। বায়ুমণ্ডলে প্রবেশ বা পৃথিবীতে না ফিরে LEO, GEO, EML1, EML2, EML4/5 ও অন্যান্য কেন্দ্রের মধ্যে চলে।

তাদের কাজ:

- AstroLiner-এর খালাসস্থল থেকে লক্ষ্য কক্ষপথে মডিউল পৌঁছানো;
- সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র, ডেটা সেন্টার ও বড় ট্রাস টেনে নেওয়া;
- প্রপেল্যান্ট ও কার্যকর তরল বহন;
- যাত্রী মডিউল বহন;
- বিদ্যুৎ কেন্দ্রের অংশ সেবা ও বদল;
- অবতরণের জন্য ক্যাপসুলকে কার্যকর কক্ষপথে নেওয়া;
- খালি টাগ EML1 বা EML4/5-এ ফেরানো;
- কক্ষীয় নির্মাণকেন্দ্রকে সহায়তা।

এই যানগুলো বৈদ্যুতিক, চৌম্বক-প্লাজমা-গতীয়, পারমাণবিক-বৈদ্যুতিক, সৌর-বৈদ্যুতিক বা সংকর প্রপালশন ব্যবহার করতে পারে। বায়ুমণ্ডলে ঢুকতে হয় না বলে বড় রেডিয়েটর, হালকা ট্রাস, বড় কার্যকর-তরল ট্যাংক, বদলযোগ্য প্রপালশন ইউনিট এবং কক্ষীয় নির্মাণকেন্দ্রে রক্ষণাবেক্ষণের মতো বৈশিষ্ট্যে বিশেষায়িত করা যায়।

পরিণত কাঠামোতে আন্তঃকক্ষীয় পরিবহনই StarRoad-কে উৎক্ষেপণ ব্যবস্থা থেকে মহাকাশ পরিবহন নেটওয়ার্কে রূপ দেয়।

8.10. পৃথিবী ও অন্যান্য গ্রহে অবতরণ

বিশেষ ক্যাপসুল অবতরণ করে, তাই AstroLiner-কে সব কাজের সর্বজনীন পুনঃপ্রবেশযান হতে হয় না।

প্রধান ধরন:

যাত্রী ক্যাপসুল (PC) — মানুষের জন্য; নিরাপদ প্রবেশ, জরুরি অবস্থা, স্বয়ংক্রিয় অবতরণ ও যাত্রী মডিউলের সঙ্গে সংযোগের উপযোগী।

পণ্য ক্যাপসুল (CCap) — দামি পণ্য, নমুনা, সরঞ্জাম, জীববস্তু, ইলেকট্রনিক্স এবং পৃষ্ঠে ফেরার প্রয়োজনীয় অংশের জন্য।

শিল্প প্রত্যাবর্তন ক্যাপসুল (IRC) — ভবিষ্যতে বাজার তৈরি হলে বিপুল পরিমাণ উপাদান ফেরানোর শক্তিশালী পণ্য ক্যাপসুল।

AstroLiner ক্যাপসুলকে কক্ষপথে তোলে। আন্তঃকক্ষীয় টাগ, অথবা প্রথম দিকে AstroLiner নিজেই, ক্যাপসুলকে অবতরণ কার্যকর কক্ষপথে নিয়ে যায়। বিচ্ছেদের পর প্রতিটি ক্যাপসুল স্বাধীনভাবে প্রবেশ ও অবতরণ করে।

চাঁদ, মঙ্গল, শুক্র ও গ্রহাণুতে তাদের পরিবেশের উপযোগী আলাদা অবতরণ ব্যবস্থা থাকবে। বায়ুমণ্ডল, মাধ্যাকর্ষণ, তাপপ্রবাহ, ধূলা ও উৎক্ষেপণ-চাহিদার পার্থক্য এত বেশি যে একটি সর্বজনীন অবতরণযান সৌরজগতের সব জ্যোতিষ্কে কাজ করতে পারে না।

8.11. মানসম্মত মডিউল

মানসম্মতকরণ StarRoad রসদের ভিত্তি। সামুদ্রিক কনটেইনার ব্যবস্থা যেমন বিশ্ববাণিজ্য বদলেছে, মানসম্মত কক্ষীয় মডিউল তেমনি মহাকাশ অর্থনীতি বদলাবে।

মূল মডিউলের ধরন:

যাত্রী মডিউল (PM) — AstroLiner, আন্তঃকক্ষীয় যান, কক্ষীয় স্টেশন বা যাত্রী ক্যাপসুলে ব্যবহারযোগ্য চাপযুক্ত মডিউল। এতে জীবনরক্ষা ব্যবস্থা, আসন বা কেবিন, জরুরি মজুত, ডকিং সংযোগ ও মানসম্মত আটকাবার স্থান থাকে।

পণ্য কনটেইনার (CC) — প্যানেল, ট্রাস, রেডিয়েটর, কেবল, সরঞ্জাম, রোবট ব্যবস্থা, খুচরা যন্ত্রাংশ ও ভোগ্যপণ্যের জন্য চাপযুক্ত বা চাপবিহীন কনটেইনার।

প্রপেল্যান্ট মডিউল (PrM) — টাগ ও স্টেশনের জন্য প্রপেল্যান্ট, কার্যকর তরল, পানি, অক্সিজেন, হাইড্রোজেন, আর্গন, জেনন বা অন্যান্য ভোগ্য মাধ্যম সংরক্ষণ করে।

উপযোগ মডিউল (UM) — বিদ্যুৎ, তাপবর্জন, যোগাযোগ বা নিয়ন্ত্রণ মডিউল; এতে সৌরপ্যানেল, ব্যাটারি, রেডিয়েটর, অ্যান্টেনা, রূপান্তরক, তাপবিনিময়ক ও নিয়ন্ত্রণ ইলেকট্রনিক্স থাকতে পারে।

নির্মাণ মডিউল (CM) — ট্রাস, বিম, ফ্রেম অংশ, রোবট সংযোজক, আটক ব্যবস্থা, টেথার, কেবলপথ ও প্রসারণশীল কাঠামো বহন করে।

বিদ্যুৎ সঞ্চালন মডিউল (PTM) — মাইক্রোওয়েভ অ্যান্টেনা, ফেজড অ্যারে, পাওয়ার ইলেকট্রনিক্স এবং রশ্মি লক্ষ্য ও নিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থা বহন করে।

প্রতিটি মডিউলে মানসম্মত হওয়া উচিত:

- মাত্রার শ্রেণি;
- কাঠামোগত সংযোগ;
- রোবটের ধরার স্থান;
- ডকিং সংযোগ;
- বৈদ্যুতিক ও তাপীয় সংযোগ;
- ডিজিটাল পরিচয় ও সেবা নথি;
- অনুমোদিত ভর ও ভারকেন্দ্রের সীমা;
- জরুরি আটক ও বিচ্ছেদ পদ্ধতি।

এতে স্টেশন, মহাকাশযান, বিদ্যুৎ কেন্দ্র ও শিল্প কমপ্লেক্স অনন্য যান হিসেবে নয়, মানসম্মত ব্লকের সমন্বয়ে নির্মিত হবে।

8.12. কক্ষীয় অবকাঠামোর স্তরবিন্যাস

StarRoad-এর কক্ষীয় রসদ কেন্দ্রগুলোর স্তরবিন্যাস হিসেবে সাজানো।

পৃথিবী / StarRoad

। উৎপাদন, সংযোজন, উৎক্ষেপণ, AstroLiner মেরামত, মডিউল উৎপাদন, প্রপেল্যান্ট প্রস্তুতি, জ্বালানি সরবরাহ ও পণ্যপ্রবাহ নিয়ন্ত্রণ।

LEO

। অবতরণ ক্যাপসুল, পরিদর্শন, জরুরি অবস্থা, অস্থায়ী কাজ ও প্রবেশের আগে ক্যাপসুল বিচ্ছেদের সেবা এলাকা। পরিণত ব্যবস্থায় এটি প্রধান গুদাম বা জনাকীর্ণ শিল্পবলয় নয়।

GEO

। মাইক্রোওয়েভ রিলে, জ্বালানি প্ল্যাটফর্ম, যোগাযোগ এবং পৃথিবীর নির্দিষ্ট অঞ্চলে বিদ্যুৎ পাঠানোর এলাকা; কক্ষীয় জ্বালানি ও স্থল গ্রিড একীভূত করার উপযোগী।

EML1

। পৃথিবী-চাঁদ ব্যবস্থার প্রধান পরিবহন কেন্দ্র। পেলোডকে চূড়ান্ত গন্তব্যে সরাসরি যেতে না হলে AstroLiner এখানে এসে মডিউল খালাস করতে পারে। এখানে গুদাম, টাগ, যান-নিয়ন্ত্রণ, মেরামত কেন্দ্র ও চন্দ্র লিফটের স্থানান্তর স্টেশন থাকবে।

EML1 অত্যন্ত স্বয়ংক্রিয় হওয়া উচিত। বড় স্থায়ী কর্মীদল দরকার নেই; মানুষ বেশি সুরক্ষিত চন্দ্র লাভা নল, EML4/5 বা বড় স্টেশনে থেকে প্রয়োজনে EML1-এ যেতে পারে।

EML2

। চাঁদের দূর পৃষ্ঠ ও আশপাশে রেডিও-নীরব পর্যবেক্ষণকেন্দ্র, গভীর মহাকাশ দূরবীক্ষণ, পরীক্ষাকেন্দ্র, গভীর মহাকাশ যোগাযোগ ও বৈজ্ঞানিক স্থাপনার এলাকা।

EML4 / EML5 I

পরিণত কক্ষীয় সভ্যতার প্রধান কেন্দ্র: মহাকাশযান নির্মাণকেন্দ্র, বসতি, শিল্প স্টেশন, বড় বিদ্যুৎ কেন্দ্র, আন্তঃগ্রহ মহাকাশযান সংযোজন, গুদাম, মেরামত ঘাঁটি ও ভবিষ্যৎ সম্প্রসারণের নিয়ন্ত্রণকেন্দ্র।

8.13. কক্ষীয় মহাকাশযান নির্মাণকেন্দ্র

এগুলো প্রধানত EML4/5-এ নির্মিত হবে। উদ্দেশ্য হলো এমন কাঠামো জোড়া, যেগুলো StarRoad দিয়েও সম্পূর্ণ অবস্থায় পাঠানো যায় না বা পাঠানো উচিত নয়।

AstroLiner উপকরণ ও কাঠামো সমতল-প্যাক পণ্য হিসেবে বহন করে:

- প্যানেল;
- ট্রাস;
- কাঠামোগত প্রোফাইল;
- কেবল;
- রেডিয়েটর;
- আয়না;
- বিল্লি;
- ট্যাংক;
- ভারবাহী সংযোজন;
- রোবট সংযোজন ব্যবস্থা।

রোবট ও দূরনিয়ন্ত্রিত যন্ত্র সংযোজন করবে। মানুষ সেবা, তত্ত্বাবধান, জটিল মেরামত ও ব্যতিক্রমী সিদ্ধান্ত নেবে, তবে অধিকাংশ বিপজ্জনক সংযোজন হাতে করা উচিত নয়।

নির্মাণকেন্দ্রগুলো তৈরি করবে:

- নতুন মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র;
- বড় রেডিওর ফ্রিকোয়েন্সি;
- আন্তঃকক্ষীয় পরিবহনযান;
- আন্তঃগ্রহ মহাকাশযান;
- আবাসিক স্টেশন;
- গ্রহণ প্রক্রিয়াকরণ কমপ্লেক্স;
- ভবিষ্যৎ মহাকাঠামোর উপাদান।

এই ধাপে StarRoad শুধু পৃথিবী থেকে উৎক্ষেপণের ব্যবস্থা থাকে না। এটি এমন উৎপাদনশৃঙ্খলের নিচের সংযোগে পরিণত হয়, যেখানে পৃথিবী জটিল অংশ সরবরাহ করে এবং মহাকাশ ধীরে ধীরে সংযোজন, সেবা ও উৎপাদনের অংশ গ্রহণ করে।

8.14. কক্ষীয় ও চন্দ্র বসতি

স্থায়ী বসতি নিজেই লক্ষ্য হিসেবে নয়, বৃহৎ অবকাঠামোর সেবা-প্রয়োজন থেকে গড়ে ওঠে। বিদ্যুৎ কেন্দ্র, নির্মাণকেন্দ্র, টাগ, রিলে, চন্দ্র উৎপাদনকেন্দ্র ও শিল্প প্ল্যাটফর্ম বাড়লে পুরোপুরি দূরবর্তী সেবা আর যথেষ্ট থাকে না।

বড় কক্ষীয় বসতির প্রধান রূপ হলো স্ট্যানফোর্ড টোরাস বা তার উত্তরসূরির মতো কৃত্রিম মাধ্যাকর্ষণযুক্ত ঘূর্ণায়মান স্টেশন। এগুলো প্রধানত EML4/5-এর মতো দীর্ঘমেয়াদি উন্নয়নের উপযোগী স্থিতিশীল স্থানে থাকবে এবং কক্ষীয় শিল্পের আবাসন, সেবা, চিকিৎসা, মেরামত ও প্রশাসনিক কেন্দ্র হবে।

চন্দ্র ঘাঁটি ও শিল্প বসতির স্থায়ী কর্মীরা চাঁদের পৃষ্ঠে নয়, EML4/5-এর কৃত্রিম-মাধ্যাকর্ষণ স্টেশনে থাকবে। এতে নিম্ন চন্দ্র মাধ্যাকর্ষণের দীর্ঘমেয়াদি স্বাস্থ্যপ্রভাব সীমিত হয় এবং কর্মীরা চন্দ্র অবকাঠামোর কাছে থাকে। চাঁদের পৃষ্ঠে প্রধানত পালাক্রমিক কর্মীদের শিল্প কর্মস্থল হবে।

EML1 চন্দ্র ব্যবস্থার কেন্দ্রীয় স্থানান্তর ও রসদ কেন্দ্র হবে। পৃথিবী, চাঁদ, EML4/5 ও অন্যান্য কক্ষীয় অঞ্চলের প্রবাহের জন্য এখানে গুদাম, ডক, টাগ, জ্বালানি মডিউল, মেরামত স্থাপনা ও যান-নিয়ন্ত্রণ কেন্দ্রীভূত হবে। চাঁদের কাছে কর্মী রাখলে পৃথিবী থেকে বারবার পাঠানোর তুলনায় পালাবদল, জরুরি সাড়া, মেরামত ও চন্দ্র উৎপাদন নিয়ন্ত্রণ সহজ হয়।

চন্দ্রপৃষ্ঠকে EML1 অঞ্চলের সঙ্গে যুক্ত চন্দ্র লিফট এই কাঠামোর প্রধান অংশ। রেগোলিথ, অক্সিজেন, ধাতু, নির্মাণসামগ্রী ও শিল্প মডিউল ওপরে এবং সরঞ্জাম, ভোগ্যপণ্য ও পালাক্রমিক কর্মীদের নিচে যায়। পৃষ্ঠ থেকে বারবার রকেট ছাড়াই এটি চন্দ্র শিল্পকে কক্ষীয় নির্মাণকেন্দ্র, বসতি ও আন্তঃকক্ষীয় রসদের সঙ্গে স্থায়ীভাবে যুক্ত করে।

চাঁদের মাধ্যাকর্ষণ কম বলে বসতিগুলো প্রধানত পালাক্রমিক কর্মীদের চালিত সুরক্ষিত শিল্প ঘাঁটি হবে। এগুলো খনন, প্রক্রিয়াকরণ, জ্বালানি, নির্মাণ, স্বয়ংক্রিয় সরঞ্জাম, অক্সিজেন উৎপাদন, রেগোলিথ প্রক্রিয়াকরণ, লিফটের অংশ সংযোজন ও EML1-এর পণ্য প্রস্তুত করবে।

কক্ষীয় ও চন্দ্র বসতির বিকিরণ সুরক্ষা কয়েকটি স্তরে হবে:

- পানি, পলিইথিলিন, চন্দ্র রেগোলিথ, জ্বালানি বা মজুতের নিষ্ক্রিয় ঢাল;
- সবচেয়ে সুরক্ষিত অংশ কেন্দ্র ও ভেতরে রাখা;
- আধানযুক্ত কণাপ্রবাহ কমাতে সক্রিয় চৌম্বক সুরক্ষা;
- সৌর প্রোটন ঘটনার জরুরি আশ্রয়।

পানি, হাইড্রোজেন, পলিইথিলিন, জ্বালানি ও চন্দ্র রেগোলিথ একই সঙ্গে উপকারী মজুত ও বিকিরণ-ঢাল ভর। স্টেশন, চন্দ্র ঘাঁটি, লিফট বা EML1 কেন্দ্রের পরিচালন চক্রে যুক্ত করলে সুরক্ষা মৃত ভর হয় না।

8.15. রসদের উপমা: সামুদ্রিক নেটওয়ার্ক হিসেবে মহাকাশ

পরিণত StarRoad ব্যবস্থা উৎক্ষেপণ কর্মসূচির চেয়ে সামুদ্রিক রসদের মতো।

এই উপমায়:

- **AstroLiner** পৃথিবী ও কক্ষপথের মধ্যে অতি-ভারী কনটেইনারবাহী জাহাজ;
- **আন্তঃকক্ষীয় টাগ** বন্দর ট্রাক্টর ও সমুদ্রগামী টাগ;
- **আন্তঃকক্ষীয়** পরিবহনযান দূরপথের জাহাজ;
- **EML1** স্থানান্তর বন্দর ও বিতরণ কেন্দ্র;
- **GEO** জ্বালানি ও যোগাযোগের নোঙরক্ষেত্র;
- **EML4/5** শিল্পবন্দর, নির্মাণকেন্দ্র ও শহর।
- **ক্যাপসুল** বিশেষায়িত অবতরণযান;
- **PM, CC, PrM, UM, CM ও PTM** মডিউল হলো কনটেইনার ও কার্যকর ব্লক।

এই পদ্ধতি মহাকাশযাত্রার সংস্কৃতিই বদলে দেয়। অনন্য অভিযানের জায়গা নেয় সময়সূচি, কনটেইনার আবর্তন, মেরামত, বিমা, মান, গুদাম, বন্দর যান-নিয়ন্ত্রণ ও শিল্প পণ্য চলাচল।

8.16. পণ্যপ্রবাহের অর্থনীতি

StarRoad মহাকাশ অর্থনীতির কেন্দ্রীয় নিয়ম উল্টে দেয়। রকেট রসদে প্রতিটি কেজি দামি বলে ভর কমানো সম্ভা; StarRoad রসদে মানসম্মতকরণ, ব্যাপক উৎপাদন ও বড় চালানে উৎক্ষেপণ সম্ভা।

এতে প্রকৌশল সিদ্ধান্ত বদলে যায়:

- কার্ঠামো আরও শক্ত ও সহজে মেরামতযোগ্য করা যায়;
- সরঞ্জামে বেশি নিরাপত্তা-সীমা রাখা যায়;
- স্টেশনকে একবার-ব্যবহারযোগ্য উপগ্রহ নয়, সেবাযোগ্য স্থাপনা হিসেবে নকশা করা যায়;
- রেডিয়েটর, ঢাল ও ফ্রেমের ভর চূড়ান্ত বাধা থাকে না;
- অনেক স্বল্পায়ু ছোট যানের চেয়ে বড় প্ল্যাটফর্ম বেশি সাশ্রয়ী হয়।

মূল অর্থনৈতিক প্রভাব হলো StarRoad শুধু উৎক্ষেপণ বাজার নয়, কক্ষীয় স্থাপনার বাজার তৈরি করে। আয় পণ্য পরিবহনের পাশাপাশি বিদ্যুৎ কেন্দ্র, ডেটা সেন্টার, রিলে, টাগ, নির্মাণকেন্দ্র ও জ্বালানি নেটওয়ার্কের উৎপাদন, মালিকানা ও পরিচালনায় অংশগ্রহণ থেকেও আসতে পারে।

সম্ভাব্য বাণিজ্যিক মডেল:

- বাইরের গ্রাহককে উৎক্ষেপণ বিক্রি;
- জ্বালানি অবকাঠামোর দীর্ঘমেয়াদি চুক্তি;
- মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্রের মালিকানা ও পরিচালনা;
- জ্বালানি কোম্পানির সঙ্গে যৌথ উদ্যোগ;
- কক্ষীয় ডেটা সেন্টারের ক্ষমতা ভাড়া;
- স্থল রেক্টেনার মাধ্যমে বিদ্যুৎ বিক্রি;
- কক্ষীয় স্থাপনার সেবা চুক্তি;
- আন্তঃকক্ষীয় পরিবহনের রসদ শুল্ক;
- স্টেশনের বিমা, মেরামত ও আয়ু বাড়ানো।

এই পদ্ধতি একক বাজারনির্ভরতা কমায়। বাইরের উৎক্ষেপণ চাহিদা যথেষ্ট না হলে StarRoad জ্বালানি ও কক্ষীয়-শিল্প কর্মসূচির মাধ্যমে নিজস্ব পণ্যপ্রবাহ তৈরি করে।

8.17. বাজার ও রসদ উন্নয়নের ধাপ

চাহিদা ও কক্ষীয় সরবরাহ ব্যবস্থা চার ধাপে বিকশিত হয়।

I. ভিত্তি ধাপ (১০-২০ বছর) — শক্তি পণ্যপ্রবাহ। AstroLiner-S

সম্পূর্ণ বা প্রায় সম্পূর্ণ মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র, ডেটা সেন্টার, রিলে, পরিষেবা মডিউল ও প্রথম টাগ উৎক্ষেপণ করে। প্রধান লক্ষ্য নিয়মিত উৎক্ষেপণ প্রমাণ করা, প্রথম বাণিজ্যিক শক্তি স্থাপনা গড়া এবং কক্ষীয় বিদ্যুৎ উৎপাদনের বাজার তৈরি করা।

II. পরিণত ধাপ (২০-৫০ বছর) — কক্ষীয় পরিষেবা নেটওয়ার্ক।

GEO রিলে, EML1 কেন্দ্র, পরিষেবা স্টেশন, মেরামত যান, টাগ এবং EML4/5-এ প্রথম স্থায়ী বসতি ও মহাকাশযান নির্মাণকেন্দ্র তৈরি হয়। AstroLiner ধীরে ধীরে প্রতিটি গন্তব্যে সরাসরি উড্ডয়ন থেকে নেটওয়ার্ক কেন্দ্রে পণ্য নামানো ভারী পরিবহন ব্যবস্থার ভূমিকায় আসে।

III. শিল্প ধাপ (৫০-১০০ বছর) — পৃথিবীর বাইরে উৎপাদন।

আন্তঃগ্রহ মহাকাশযান, গ্রহাণু প্রক্রিয়াকরণ কমপ্লেক্স ও বড় কক্ষীয় আবাসের সক্রিয় নির্মাণ শুরু হয়। ব্যবস্থা পৃথিবীর বাইরের উপাদান বেশি ব্যবহার করে, ফলে পৃথিবী থেকে বিপুল কাঁচামাল পাঠানোর নির্ভরতা কমে।

IV. বিবর্তন ও সম্ভাবনার ধাপ (১০০+ বছর) — সৌরজগতের অবকাঠামো।

EML4/5 সৌরজুড়ে সম্প্রসারণ, মহাকাঠামো, সৌরঝাঁক, ও'নিল সিলিন্ডার, গভীর-মহাকাশ দূরবীক্ষণ এবং আন্তঃনাস্ত্রিক অভিযানের প্রস্থানকেন্দ্র হয়।

এই ক্রম গুরুত্বপূর্ণ: StarRoad-এর শুরুতেই পূর্ণ বিকশিত মহাকাশসভ্যতা দরকার হয় না। এটি স্পষ্ট চাহিদার উৎস—শক্তি ও গণনা—দিয়ে শুরু করে, তারপর পূর্ণ মহাকাশ অর্থনীতিতে বিস্তৃত হয়।

8.18. বিবর্তনের সম্ভাবনা: StarRoad-এর উত্তরসূরি

StarRoad-কে গ্রহীয় পরিবহন অবকাঠামোর চূড়ান্ত রূপ হতে হবে না। এটি রকেট যুগ ও পরিণত মহাকাশ-প্রকৌশল মহাকাঠামোর মধ্যে পরিবর্তনের প্রয়োজনীয় ধাপ।

পরিচিত কাল্পনিক ব্যবস্থাগুলোর—মহাকাশ লিফট, লঞ্চ লুপ, StarTram, কক্ষীয় বলয় ও মহাকাশ মিনার—মধ্যে কেবল উন্নত কক্ষীয় বলয় শেষ পর্যন্ত StarRoad-এর পণ্যক্ষমতা ছাড়াতে পারে। কিন্তু এর জন্য শক্তিশালী কক্ষীয় শিল্প, বিপুল উপকরণ, নির্মাণকেন্দ্র, জ্বালানি, রোবট সংযোজন ও মহাকাঠামো পরিচালনার অভিজ্ঞতা দরকার।

সম্ভাব্য উত্তরসূরি দুটি যুক্ত বলয়ের ব্যবস্থা:

- পৃথিবী ঘিরে এবং সর্বনিম্ন বিন্দুতে পৃষ্ঠের সঙ্গে মেলা পরিবহন বলয়;
- GEO উচ্চতায় ভূসমলয় বন্দর বলয় ও মহাকাশ ডক;
- পরিবহন বলয়ের সিল করা শ্যাফটে কয়েকটি চলমান কেবল রোটর;
- পথের সর্বোচ্চ বিন্দুতে পরিবহন ও ভূসমলয় বন্দর বলয়ের সংযোগ।

লঞ্চ লুপের মতো পরিবহন বলয়ে সিল করা পথে দ্রুত রোটর থাকবে, তবে এটি আরও নিরাপদ হতে পারে। এর চলমান কেবল রোটর তীক্ষ্ণ বাঁক নেয় না এবং অনেক কম অরীয় চাপ পায়; জরুরি বিচ্ছেদে পুরো কাঠামো ধ্বংস না করে গ্রহ থেকে দূরে যাওয়ার মতো নকশা করা যায়। এটি পৃষ্ঠ থেকে ভূসমলয় বন্দর বলয় পর্যন্ত বিস্তৃত গতিশীল বৃত্তাকার মহাকাশ মিনার হবে।

এই ব্যবস্থা প্রথম StarRoad-এর বিকল্প নয়, সম্ভাব্য উত্তরসূরি। StarRoad বা সমতুল্য মূল পরিবহন ব্যবস্থা ছাড়া কক্ষীয় বলয়ের ভর, সরঞ্জাম, নির্মাণকেন্দ্র ও জ্বালানি ক্ষমতা যথেষ্ট সম্ভায় পাঠানো যায় না।

8.19. গ্রহ-প্রকৌশলের সম্ভাবনা: একক সম্পদব্যবস্থা হিসেবে সৌরজগত

StarRoad ভবিষ্যতে বৃহৎ মহাকাশ-প্রকৌশল ও গ্রহ-রূপান্তরের মতো আজ অচিন্তনীয় সম্ভাবনা খুলতে পারে। এগুলো পরিণত সৌরজগতীয় অবকাঠামোর পরের সভ্যতাগত দৃশ্যপট: পৃথিবী থেকে সম্ভা উত্তোলন, মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ, EML4/5 নির্মাণকেন্দ্র, গ্রহাণু খনন, আন্তঃগ্রহ পরিবহন, ট্যাংকার বহর ও গভীর মহাকাশে স্বয়ংসম্পূর্ণ জ্বালানি।

মূল ধারণা হলো শুক্র ও মঙ্গলকে দুটি আলাদা কর্মসূচি নয়, এক সম্পদব্যবস্থা হিসেবে দেখা। মঙ্গলে নাইট্রোজেন, হাইড্রোজেন, ঘন বায়ুমণ্ডল ও চৌম্বক সুরক্ষা কম। শুক্রে বিপুল CO₂ ও নাইট্রোজেন এবং পৃথিবীসদৃশ ভর ও মাধ্যাকর্ষণ আছে, কিন্তু তা প্রায় ৪৬০°C তাপমাত্রা, ৯২ বায়ুচাপ, CO₂ বায়ুমণ্ডল, সালফিউরিক অ্যাসিডের মেঘ, চৌম্বকক্ষেত্রের অভাব ও অত্যন্ত ধীর বিপরীত ঘূর্ণনের চরম পরিবেশে আবদ্ধ।

8.19.1. প্রস্তুতি ধাপ: সৌরজগতের অবকাঠামো

গ্রহ-রূপান্তর শুরুর আগে থাকতে হবে:

- পৃথিবী থেকে কম খরচে ভর তোলার StarRoad;
- জ্বালানির উৎস হিসেবে মহাকাশ সৌরকেন্দ্র ও সৌরঝাঁক;
- EML4/5-এ কক্ষীয় নির্মাণকেন্দ্র;
- ধাতু, পানি ও উদ্বায়ী পদার্থের উন্নত গ্রহাণু খনন;
- কয়েক দশক বা শতাধিক উন্নত স্বয়ংসম্পূর্ণ মহাকাশ বসতি ও সহায়ক জ্বালানি কেন্দ্র;
- হাইড্রোজেন, পানি, নাইট্রোজেন ও CO₂ বহনকারী ট্যাংকার বহর;
- দূরপথের পারমাণবিক-বৈদ্যুতিক বা সংযোজন পরিবহন।

এ ধরনের কর্মসূচি StarRoad পরিচালনা শুরুর অন্তত ১০০+ বছর পরে শুরু করাই যুক্তিসঙ্গত; মহাকাশ অবকাঠামো সূচকীয় হারে বাড়লে সময় কমতে পারে।

8.19.2. শুক্র: গ্রহ-রূপান্তরের ধাপ

বৃহৎ দীর্ঘমেয়াদি বসতির জন্য শুক্র মঙ্গলের চেয়ে উপযোগী হতে পারে: মাধ্যাকর্ষণ প্রায় ০.৯g, ভর পৃথিবীর কাছাকাছি এবং সৌরশক্তি প্রচুর। মূল সমস্যা অত্যন্ত উঁচু প্রাথমিক বাধা।

1. শীতলীকরণ ও CO₂

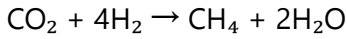
অবক্ষিপ্ত। শুক্র-সূর্য L1 বিন্দুতে বড় ছায়াপর্দা আগত শক্তি কমায়। গভীর শীতলীকরণে CO₂-এর বড় অংশ তরল বা কঠিন হয়ে পৃষ্ঠে বসে, চাপ দ্রুত কমে এবং নরকসদৃশ পরিবেশ প্রকৌশল ও নির্মাণযোগ্য হয়।

2. অর্ধ-সমলয় বলয় ও কক্ষীয় বন্দর।

শীতল হওয়ার পরে ভবিষ্যৎ ২৪-ঘণ্টার সমলয় কক্ষপথের উচ্চতা, পৃষ্ঠের প্রায় ৩৩,৪০০ কিমি ওপরে গতিশীলভাবে সমর্থিত বলয় নির্মিত হবে। পরিধি প্রায় ২৪৮,০০০ কিমি, স্থানীয় মাধ্যাকর্ষণ ০.০২১g এবং মুক্ত বৃত্তীয় বেগ ২.৮৭ কিমি/সে। শুক্রের ঘূর্ণন ধীর থাকা পর্যন্ত সক্রিয় রোটর বলয় ধরে রাখবে; এটি কক্ষীয় বন্দর, জ্বালানি কেন্দ্র ও ট্যাংকার গ্রহণস্থল হবে।

3. বায়ুমণ্ডল প্রক্রিয়াকরণ ও হাইড্রোজেন

আমদানি। অবক্ষিপ্ত CO₂ প্রক্রিয়াকরণ কমপ্লেক্সে তোলা হবে। হাইড্রোজেন আসবে বহিঃসৌরজগত, বরফময় জ্যোতিষ্ক ও গ্রহাণু থেকে। CO₂ বাঁধার মূল বিক্রিয়া:



পানি মহাসাগর ও অক্সিজেনে, মিথেন জ্বালানি ও রাসায়নিক কাঁচামালে ব্যবহৃত হবে; কার্বন উপকরণ ও দীর্ঘমেয়াদি ভাণ্ডারে বাঁধা হবে; সালফার যৌগ খনিজে রূপান্তরিত হবে। অতিরিক্ত নাইট্রোজেন ও কিছু CO₂ মঙ্গলে পাঠানো যাবে।

4. বাসযোগ্য

শুক্র। মহাসাগর, নাইট্রোজেন-অক্সিজেন বায়ুমণ্ডল, নিয়ন্ত্রিত জলবায়ু, চৌম্বক সুরক্ষা ও প্রাথমিক জীবমণ্ডল গড়লে প্রধান রূপান্তর সম্পূর্ণ ধরা যায়। প্রায় ১২০ ঘণ্টার মধ্যবর্তী ঘূর্ণনেও বসবাস সম্ভব; প্রায় ৬০ ঘণ্টার রাত মহাসাগর, মেঘ, ১.৩–১.৬ bar বায়ুমণ্ডল, তাপ পরিবহন, আয়না ও ছায়াপর্দা সামলাবে।

5. কক্ষপথ থেকে ঘূর্ণন সংশোধন ও ২৪-

ঘণ্টার দিন। ২৪ ঘণ্টার ঘূর্ণন বাসযোগ্যতার শর্ত নয়, দীর্ঘ প্রকৌশল উন্নতি। বর্তমান বিপরীত ঘূর্ণন থেকে সরাসরি ২৪ ঘণ্টায় যেতে প্রায় ৪.৩×১০³³ kg·m²/s কৌণিক ভরবেগ বাড়তে হবে। প্রায় ১০০ km/s নিষ্কাশনবেগে ১.১×১০²¹ kg কার্যকর তরল দরকার। আদর্শ জেট শক্তি ৫×১০^{3০} J হলে ৩০০ EW-এ প্রায় ৫০০–৬০০ বছর; ক্ষতি ও ১০³¹–৩×১০³¹ J ধরলে ৩০০ EW-এ ১,০০০–৩,০০০ বছর এবং ১০০–২০০ EW-এ কয়েক হাজার বছর। গ্রহ ও অর্ধ-সমলয় বলয়ের বিপরীত দুই পাশে যুক্ত দুটি পরিবহন বলয় ঘূর্ণন ভরবেগ পৃষ্ঠে দেয় এবং অতিরিক্ত স্থিতি আনে। ২৪ ঘণ্টা হলে বলয় পূর্ণ সমলয় শুক্র ডক হবে।

8.19.3. মঙ্গল: গ্রহ-রূপান্তরের ধাপ

মঙ্গলে প্রথম ঘাঁটি সহজ, সম্পূর্ণ গ্রহীয় পরিবেশ কঠিন। মাধ্যাকর্ষণ প্রায় ০.৩৮g, বায়ুমণ্ডল পাতলা, নাইট্রোজেন ও সহজলভ্য উদ্বায়ী পদার্থ কম, চৌম্বক সুরক্ষা দুর্বল। তাই শুক্র, গ্রহাণু ও বহিঃসৌরজগত থেকে পদার্থ আমদানি দরকার।

1. কৃত্রিম চৌম্বকমণ্ডল

দীর্ঘমেয়াদি রূপান্তরের প্রথম শর্ত চৌম্বক সুরক্ষা: পৃথিবীর সমলয় ও পরিবহন বলয়ের মতো কক্ষীয় বলয়, জ্বালানি ও প্রতিফলক প্ল্যাটফর্ম এবং সমলয় বলয়ে যুক্ত চৌম্বক ব্যবস্থা। এটি না থাকলে নতুন বায়ুমণ্ডল সৌরবায়ুতে ক্ষয় হবে।

মঙ্গল বলয় পরিবহন, কক্ষপথ, জ্বালানি ও চৌম্বকমণ্ডলীয় কাজ একত্র করবে; সংযুক্ত সৌরপ্যানেল ও সঞ্চয় ব্যবস্থা কৃত্রিম ক্ষেত্রের সার্কিট, পাওয়ার ইলেকট্রনিক্স ও নিয়ন্ত্রণকে শক্তি দেবে।

2. বায়ুমণ্ডল ও

পানি আমদানি। নাইট্রোজেন ও কিছু CO₂ শুক্র থেকে, পানি গ্রহাণু, বরফময় জ্যোতিষ্ক ও বহিঃসৌরজগত থেকে আসবে। যৌথ সম্পদ নেটওয়ার্ক মঙ্গলের ঘাটতি পূরণ করে শুধু নিজস্ব সম্পদ দিয়ে বায়ুমণ্ডল বানানোর চেয়ে দ্রুত নরম ও স্থিতিশীল জলবায়ু দেবে।

3. বায়ুমণ্ডল ঘন করা ও জলবায়ু উষ্ণ

করা। চৌম্বক সুরক্ষার পর CO₂, নাইট্রোজেন, জলীয়বাষ্প ও অতিরিক্ত গ্রিনহাউস পদার্থ বায়ুমণ্ডল বাড়ায়। ঘন বায়ু নিম্ন তাপমাত্রার অংশ পুষিয়ে, তাপ পরিবহন ও চাপ বাড়িয়ে তরল পানির অঞ্চল বিস্তৃত করে।

4. পানি, মাটি ও

জীবমণ্ডল। জলাধার তৈরি, রেগোলিথ প্রক্রিয়াকরণ, মাটির বিষাক্ততা কমানো এবং অণুজীব ও উদ্ভিদ বাস্তুতন্ত্র শুরু হবে: সুরক্ষিত স্থানীয় জীবমণ্ডল, আঞ্চলিক জলবায়ু অঞ্চল, তারপর বৈশ্বিক স্থিতি।

5. গ্রহজুড়ে

ব্যবহারযোগ্য পরিবেশ। যথেষ্ট নাইট্রোজেন, CO₂ ও পানি আমদানিতে মঙ্গল ঘন নিয়ন্ত্রিত বায়ুমণ্ডল, কৃত্রিম চৌম্বক সুরক্ষা, জলভাণ্ডার, জৈব অঞ্চল ও বৃহৎ শিল্প পেতে পারে। ০.৩৮g-এ পৃথিবীসদৃশ দীর্ঘ বসতিতে শুক্রের চেয়ে কম উপযোগী হলেও কম মাধ্যাকর্ষণ সস্তা উঠানামা, সহজ কক্ষীয় রসদ, বিশাল কাঠামো, কম-মাধ্যাকর্ষণ উৎপাদন এবং অন্তঃসৌরজগত ও গ্রহাণুবলয়ের মধ্যে শিল্প-বিজ্ঞান-স্থানান্তর কেন্দ্রের সুবিধা দেয়।

8.19.4. সম্মিলিত দৃশ্যপটের সুবিধা

শুক্র-মঙ্গল-বহিঃসৌরজগতের সম্মিলিত দৃশ্যপট আলাদা যে কোনো পদ্ধতির চেয়ে শক্তিশালী। মঙ্গল একা নাইট্রোজেন, পানি, জ্বালানি ও চৌম্বক সুরক্ষার ঘাটতিতে বাধা পায়; শুক্র একা অতিরিক্ত CO₂-এর ব্যবহারকারী ছাড়াই বিশাল বায়ুমণ্ডল প্রক্রিয়া করে। যৌথ মডেলে শুক্রের নাইট্রোজেন ও CO₂ মঙ্গলকে, বহিঃসৌরজগতের হাইড্রোজেন ও পানি শুক্রকে, গ্রহাণু শিল্প ধাতু ও নির্মাণ ভর সরবরাহ করে।

এই যুক্তিতে StarRoad সরাসরি গ্রহ-রূপান্তর যন্ত্র নয়, কারণশৃঙ্খলের প্রথম ধাপ: StarRoad সস্তা উত্তোলন, সৌরকেন্দ্র জ্বালানি, EML4/5 নির্মাণকেন্দ্র, গ্রহাণু খনন কাঁচামাল এবং ট্যাংকার গ্রহের মধ্যে পদার্থ বিনিময় দেয়; তারপরই গ্রহ-প্রকৌশল সম্ভব হয়।

8.20. কৌশলগত উপসংহার

StarRoad ও AstroLiner উৎক্ষেপণ কর্মসূচি নয়, স্থায়ী মহাকাশ অর্থনীতি তৈরি করে।

প্রাথমিক বাজার মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ, কক্ষীয় ডেটা সেন্টার ও জ্বালানি অবকাঠামো। পরিণত বাজার সেবা, মেরামত, বিদ্যুৎ রিলে, আন্তঃকক্ষীয় রসদ, নির্মাণকেন্দ্র ও বসতি। শিল্প ধাপ গ্রহাণু ও আন্তঃগ্রহ অর্থনীতি গড়ে; বিবর্তন ধাপ মহাকাঠামো, দূর অভিযান ও সভ্যতার দীর্ঘ বিস্তারের পথ খোলে।

এই অংশের কেন্দ্রীয় কথা হলো StarRoad পুরোনো মহাকাশযাত্রা মডেলে বাজার খোঁজে না; এটি এমন নতুন বাজার তৈরি করে যেখানে বিপুল পণ্যপ্রবাহ, কক্ষীয় জ্বালানি, গণনা অবকাঠামো ও মহাকাশ শিল্প একটি রসদব্যবস্থা।

৯. প্রকল্পের অর্থনৈতিক মডেল

9.1. পদ্ধতি ও প্রধান অনুমান

অর্থনৈতিক মডেলটি নিম্নলিখিত নীতির ওপর দাঁড়ানো:

- **ধারাবাহিক ও নিজস্ব উৎপাদন:** বৃহৎ পরিসরে উৎপাদন টানেল খননযন্ত্র, জেনারেটর ও সঞ্চয়ব্যবস্থার খরচ ৩০-৫০% কমায়ে।
- **স্থানীয়করণ:** আফ্রিকার সম্পদ, শ্রম ও উপকরণ ব্যবহার; Spon's African Construction Cost Handbook দিয়ে হিসাব সমন্বয়।
- **বর্তমান বাজারদর:** BESS ও ভূতাপীয় বিদ্যুৎকেন্দ্রের জন্য ২০২৫-২০২৬ সালের তথ্য।
- **নির্দেশক বিনিময় হার:** 1 USD ≈ 100 RUB / 0.90 EUR। সব হিসাব মূল্যস্ফীতি বাদ দিয়ে ২০২৫ সালের স্থির ডলারে। ±৩০% অনিশ্চয়তা প্রাক-সম্ভাব্যতা সমীক্ষায় স্বাভাবিক।

9.2. আফ্রিকান পরিবেশে খননব্যয়

Spon's African Construction Cost Handbook আফ্রিকার ১৩টি দেশে শ্রম ও উপকরণের ব্যয় বিস্তারিত দেয়। পরিস্থিতির ব্যাপক তারতম্যের কারণে অতিবৃহৎ ছেদের টানেলের সরাসরি একক মূল্য দেয় না, তবে অনুমান সমন্বয়ের নির্ভরযোগ্য ভিত্তি দেয়।

কাজের ধরন	পরিমাণ	প্রতি কিমি গড় খরচ	মোট খরচ (বিলিয়ন USD)	হিসাবের ভিত্তি
প্রধান টানেল (১৭.৫ × ১২.৫ মি)	২,০৫০ কিমি	১২-১৮ মিলিয়ন মার্কিন ডলার	\$24.6-36.9	বৃহৎ ছেদের বৈশ্বিক তথ্য আফ্রিকার পরিবেশে অনুযায়ী সমন্বয় করে বহির্প্রক্ষেপণ।
সংগ্রাহক টানেল (৬ × ২,০৫০ কিমি, ৪২ মি)	১২,৩০০ কিমি	৩-৫ মিলিয়ন মার্কিন ডলার	\$36.9-61.5	আফ্রিকার বাস্তব খনি নির্মাণের তথ্য: ছোট ছেদে ৩,৫০০ মার্কিন ডলার/মি।
পরিষেবা টানেল (৪৩ মি)	২,০৫০ কিমি	৪-৬ মিলিয়ন মার্কিন ডলার	\$8.2-12.3	সংগ্রাহক টানেলের মতো, বড় ছেদের জন্য সমন্বিত।
ঢালু টানেল (৪০ × ১৬ কিমি, ১৭.৫ × ১২.৫ মি)	৬৪০ কিমি	১২-২২ মিলিয়ন মার্কিন ডলার	\$7.7-14.1	প্রধান টানেলের মতো, ৩০° ঢালের অতিরিক্ত ব্যয়সহ।
মোট খনন দৈর্ঘ্য	১৭,০৪০ কিমি		\$77.4-124.8	

9.3. নিজস্ব উৎপাদনের টানেল খননযন্ত্র বহর

৪০টি প্রধান, ২৪০টি সংগ্রাহক ও ৪০টি পরিষেবা খননযন্ত্রের ধারাবাহিক অর্ডার এবং গ্যাবন ও গণতান্ত্রিক কঙ্কো প্রজাতন্ত্রে সংযোজন লাইন খরচ ৩০-৫০% কমায়।

শিল্পের ধরন	ব্যাস	সংখ্যা	ধারাবাহিক ও নিজস্ব উৎপাদনে একক মূল্য	মোট (বিলিয়ন USD)
প্রধান টানেল খননযন্ত্র (SR-Main)	প্রায় ১৮ মি	৪০টি	৩৫-৬০ মিলিয়ন মার্কিন ডলার	\$1.4-2.4
সংগ্রাহক টানেল খননযন্ত্র (SR-Collector)	২ মি	২৪০টি	০.৮-১.৫ মিলিয়ন মার্কিন ডলার	\$0.19-0.36
পরিষেবা টানেল খননযন্ত্র (SR-Service)	৩ মি	৪০টি	১.২-২ মিলিয়ন মার্কিন ডলার	\$0.05-0.08
সংযোজন কারখানা (২টি)	—	—	১-২ বিলিয়ন মার্কিন ডলার	\$1-2
সব খননযন্ত্রের মোট				\$2.64-4.84

9.4. স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপশক্তি ব্যবস্থা

কেনিয়ার বাস্তব ৩৫ MW মেনেস্জাই ভূতাপীয় বিদ্যুৎকেন্দ্রে খনন ও বাষ্পকূপসহ প্রায় ৩৫-৪০ মিলিয়ন মার্কিন ডলার, অর্থাৎ ১,০০০-১,২৫০ মার্কিন ডলার/kW খরচ হয়েছে। ৪০টি কেন্দ্র ধারাবাহিকভাবে নির্মাণ ও স্থানীয় উৎপাদন করলে একক খরচ ৮০০-১,২০০ মার্কিন ডলার/kW ধরা যায়।

- একটি 2.5 GW কেন্দ্রের ব্যয়: \$2.0-3.0 বিলিয়ন।
- ৪০টি কেন্দ্রের ব্যয়: \$80-120 বিলিয়ন।

এই হিসাব রুশ ভূতাপীয় কেন্দ্রের নিম্ন ব্যয়—ইতুরূপের তথ্য অনুযায়ী প্রায় \$650/kW—ও জটিল প্রকল্পের ঊর্ধ্ব সীমা \$1,500/kW দ্বারা সমর্থিত।

হিসাবে ভূতাপীয় ব্যবস্থার মোট ক্ষমতার 100 GW ঊর্ধ্ব অনুমান নেওয়া হয়েছে। প্রকৃত ক্ষমতা ভূতাত্ত্বিক অনুসন্ধানের পরই জানা যাবে এবং অনেক কম, এমনকি কয়েক গিগাওয়াটও হতে পারে। সে ক্ষেত্রে মুক্ত অর্থ বিকল্প শক্তি উৎপাদনের উৎস নির্মাণে যাবে।

9.5. শক্তি সঞ্চয় ব্যবস্থা

সঞ্চয়ের তিনটি স্তর রয়েছে:

9.5.1. প্রাথমিক স্তর: টার্মিনালে দীর্ঘমেয়াদি সঞ্চয়

৪০টি টার্মিনালে স্থাপিত ব্যবস্থা একটি উৎক্ষেপণের প্রয়োজনীয় ৩৬০ GWh শক্তি বাড়তি মার্জিনসহ সঞ্চয় করে। বর্তমান দামে পছন্দের প্রযুক্তি:

সঞ্চয় প্রযুক্তি	একক খরচ	উৎস
মাধ্যাকর্ষণ শক্তি সঞ্চয়	৫০-১০০ মার্কিন ডলার/kWh	Energy Vault-এর অভিজ্ঞতা: ২৫ MW/১০০ MWh-এর জন্য ৭.৭ মিলিয়ন ডলার, অর্থাৎ ৭৭ ডলার/kWh। দক্ষতা ৭৫-৮৫%, আয়ু ৩০-৪০ বছর।
জলতাপীয় প্রধান খালের পাম্পড-স্টোরেজ ও ক্ষুদ্র জলবিদ্যুৎ	৮০-১৫০ মার্কিন ডলার/kWh	পথের স্বাভাবিক উচ্চতার পার্থক্য ব্যবহার করে।
লিথিয়াম-আয়ন BESS	সম্পূর্ণ স্থাপনাসহ ১২৫ মার্কিন ডলার/kWh	Ember (২০২৫) অনুযায়ী চীনা সরঞ্জাম ৭৫ ডলার/kWh এবং স্থাপনা ৫০ ডলার/kWh। ২১৫ GWh পরিসরে খরচ ১০০ ডলার/kWh হতে পারে।

মোট প্রাথমিক ক্ষমতা ৩৬০ GWh, অর্থাৎ একটি পূর্ণ ত্বরগচক্র। ৭০% মাধ্যাকর্ষণ/পাম্পড-স্টোরেজ ও ৩০% BESS মিশ্রণে খরচ:

উপাদান	ক্ষমতা	একক খরচ	খরচ
মাধ্যাকর্ষণ + পাম্পড-স্টোরেজ	২৫০ GWh	৬০ মার্কিন ডলার/kWh	১৫ বিলিয়ন মার্কিন ডলার
BESS	১১০ GWh	১২৫ মার্কিন ডলার/kWh	১৩.৭৫ বিলিয়ন মার্কিন ডলার
প্রাথমিক স্তর মোট	৩৬০ GWh		২৮.৭৫ বিলিয়ন মার্কিন ডলার

অনিশ্চয়তাসহ সীমা: ২২-৩৫ বিলিয়ন মার্কিন ডলার।

9.5.2. দ্বিতীয় স্তর: কয়েলের কাছে ও টানেলে বাফার

কয়েলের কাছে ফ্লাইহুইল ক্ষণস্থায়ী পরিবর্তন মসৃণ করে। একক খরচ ০.৫-১ মিলিয়ন মার্কিন ডলার/MWh; ১-৫ GWh বাফার ক্ষমতার খরচ ০.৫-৫ বিলিয়ন ডলার।

9.5.3. স্পন্দন স্তর: মাইক্রোসেকেন্ডে স্থিতিশীলতা

সুপারক্যাপাসিটর শুধু কয়েক মাইক্রোসেকেন্ডের স্পন্দন সামাল দেয় এবং হঠাৎ লোড পরিবর্তনে ভোল্টেজ স্থিতিশীল রাখে। মোট ক্ষমতা উৎক্ষেপণ শক্তির ১%-এর কম, অর্থাৎ ১-৩ GWh। ৩০০-৫০০ ডলার/kWh-এ খরচ ০.৩-১.৫ বিলিয়ন ডলার।

9.5.4. সঞ্চয়ের মোট খরচ

স্তর	প্রযুক্তি	ক্ষমতা	খরচ (বিলিয়ন USD)
প্রাথমিক	মাধ্যাকর্ষণ + পাম্পড-স্টোরেজ + BESS	৩৬০ GWh	\$22-35
বাফার	ফ্লাইহুইল	১-৫ GWh	\$0.5-5
স্পন্দন	সুপারক্যাপাসিটর	১-৩ GWh	\$0.3-1.5
মোট সঞ্চয়			\$22.8-41.5

9.6. শিল্পকেন্দ্র ও সরবরাহব্যবস্থা

ব্যয়ের খাত	খরচ (বিলিয়ন USD)	হিসাবের ভিত্তি
গ্যাবন শিল্পকেন্দ্র: শাটল ও উৎক্ষেপণ মডিউল তৈরি	\$3-6	জাহাজ নির্মাণ ডক, কারখানা ও ক্রেন
গণতান্ত্রিক কঙ্গো প্রজাতন্ত্র শিল্পকেন্দ্র: উচ্চভূমির বায়ুমণ্ডলীয় প্রবেশপথ ও উচ্চগতির মডিউল	\$2-4	পার্বত্য শিল্পকেন্দ্র ও তড়িৎ-বিশ্লেষণ ব্যবস্থা
গ্যাবন ও টাঙ্গানিকা হ্রদে বন্দর উন্নয়ন	\$1-3	জেটি, ক্রেন ও গুদাম
২,০৫০ কিমি পথে বিদ্যুৎ লাইন ও সড়ক	\$4-8	২২০ kV লাইন, সড়ক ও সেতু
জলতাপীয় প্রধান খাল	\$2-5	মাটির কাজ, আস্তরণ ও লক
মোট	\$12-26	

9.7. গবেষণা ও উন্নয়ন এবং নমুনা নির্মাণ — পর্যায় ০

ব্যয়ের খাত	সীমা (বিলিয়ন USD)	হিসাবের ভিত্তি
গাণিতিক মডেলিং ও CFD	\$0.01–0.03	তথ্যসূত্র: হাইপারলুপ ডিজিটাল টুইন উন্নয়নে ৪.৫ মিলিয়ন CHF।
২,০৫০ কিমি পথের ভূতাত্ত্বিক জরিপ	\$0.015–0.025	দুর্গম এলাকার বিস্তারিত জরিপে ৭,০০০–১২,০০০ মার্কিন ডলার/কিমি।
BIM নকশা ও নথিপত্র	\$0.02–0.05	কারিগরি চাহিদা, প্রাথমিক ও বাস্তবায়ন নকশা।
প্রবেশপথ ও অতিপরিবাহীর পরীক্ষাকেন্দ্র	\$0.01–0.03	নমুনা প্রবেশপথ-কক্ষ ও চৌম্বক উত্তোলন মডিউলের পরীক্ষামঞ্চ।
কনসোর্টিয়াম গঠন ও আইনি চুক্তি	\$0.005–0.015	আন্তর্জাতিক আলোচনা, নিবন্ধন ও বীমা।
পর্যায় ০ মোট	\$0.06–0.15	

গবেষণা বাজেট ০.০৬–০.১৫ বিলিয়ন ডলার স্থির নয়। গভীরতর সমীক্ষা, পূর্ণ আকারের প্রবেশপথের নমুনা বা বড় পরীক্ষামঞ্চে এটি ০.৫–৩ বিলিয়ন হতে পারে। তাই CAPEX সারাংশে ০.১–৩ বিলিয়ন সীমা ও ১.৫ বিলিয়ন ডলারের মধ্যম মান নেওয়া হয়েছে।

9.8. চূড়ান্ত CAPEX সারাংশ

ব্যয়ের খাত	সীমা (বিলিয়ন USD)	মধ্যম মান (বিলিয়ন USD)	CAPEX অংশ (%)
টানেল খনন	\$77.4–124.8	\$101.1	41%
খননযন্ত্র বহর ও উৎপাদন	\$2.64–4.84	\$3.74	1.5%
স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় ব্যবস্থা: ২.৫ GW-এর ৪০টি কেন্দ্র	\$80–120	\$100	40%
তিন-স্তরের সঞ্চয়	\$22.8–41.5	\$32.2	13%
শিল্পকেন্দ্র ও সরবরাহব্যবস্থা	\$12–26	\$19	8%
গবেষণা, অনুমোদন ও প্রশাসন	\$0,1–3	\$1.5	0.6%
অনিশ্চিত ব্যয়ের সংরক্ষণ (১৫%)	\$31–49	\$40	16%
মোট CAPEX	\$225–365	\$295	100%

মূল সিদ্ধান্ত: StarRoad-এর আনুমানিক মধ্যম খরচ প্রায় ৩০০ বিলিয়ন মার্কিন ডলার।

9.9. পর্যায়ভিত্তিক বণ্টন (বিলিয়ন USD)

ব্যয়ের খাত	পর্যায় ০	পর্যায় ১	পর্যায় ২	পর্যায় ৩	পর্যায় ৪	পর্যায় ৫
টানেল খনন	—	—	\$5	\$20	\$70	\$6
টানেল খননযন্ত্র	—	\$2	\$0.7	\$0.8	\$0.2	\$0.1
স্বয়ংসম্পূর্ণ ভূতাপীয় তাপ-শক্তি ব্যবস্থা	—	\$60	\$20	\$20	—	—
সঞ্চয়	—	\$10	\$10	\$8	\$3	\$1
শিল্পকেন্দ্র + সরবরাহব্যবস্থা	—	\$5	\$3	\$3	\$5	\$3
গবেষণা ও অনুমোদন	\$1.5	\$0.2	\$0.1	\$0.1	\$0.05	\$0.05
সংরক্ষণ (১৫%)	\$0.23	\$11.6	\$5.8	\$7.8	\$11.7	\$1.5
পর্যায়ের মোট	\$1.73	\$88.8	\$44.6	\$59.7	\$90	\$11.7
ক্রমপুঞ্জিত মোট	\$1.73	\$90.5	\$135.1	\$194.8	\$284.8	\$296.5

9.10. বিনিয়োগ-ফেরত ও পরিবহন খরচের বিবর্তন

এই উপধারার সব তথ্য সম্পূর্ণ তাত্ত্বিক।

9.10.1. উৎক্ষেপণের হার ও প্রতি কিলোগ্রাম খরচের বিবর্তন

StarRoad সঙ্গে সঙ্গে পূর্ণ ক্ষমতায় পৌঁছায় না। নতুন লাইন চালু, শাটল বহর বৃদ্ধি এবং কক্ষপথ অবকাঠামো গড়ার সঙ্গে উৎক্ষেপণ হার ও পরিবহন খরচ বদলায়।

ভূস্থির কক্ষপথ ও তার বাইরের পরিবহন খরচের মডেল, মার্কিন ডলার/kg:

সময়কাল	লাইন	বার্ষিক উৎক্ষেপণ	হার	পরিবহন খরচ (\$/kg)	মন্তব্য
বছর ১-২, পরীক্ষামূলক	1	12-24	মাসে ১-২টি	\$80-120	প্রথম বাণিজ্যিক উৎক্ষেপণ। পরিচালনা পরিমার্জন, বেশি পরোক্ষ ব্যয় ও ছোট উৎপাদন-পরিসর।
বছর ৩-৫	1	50-100	সপ্তাহে ১-২টি	\$30-50	ধারাবাহিক পরিচালনা শুরু। বহর ৩-৫টি শাটলে বাড়ে এবং বৃহৎ পরিসর খরচ কমায়ে।
বছর ৬-১০	1	200-300	প্রতিদিন প্রায় ১টি	\$10-20	প্রথম লাইন নকশা ক্ষমতায় পৌঁছায় এবং রক্ষণাবেক্ষণ সম্পূর্ণ স্বয়ংক্রিয় হয়।
বছর ১১-১৫	2	500-700	প্রতিদিন প্রায় ২টি	\$3-8	দ্বিতীয় লাইন চালু; স্থির ব্যয় দুই ত্বরকের মধ্যে ভাগ হয়।
বছর ১৬-২৫	3-4	1000+	প্রতিদিন ৩-৫টি	\$0.8-3	৩-৪টি সমান্তরাল লাইনে সম্প্রসারণ। ১ GW-এর বেশি ক্ষমতার মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র কক্ষপথের কৌশল ও মাল প্রক্রিয়াকরণে শক্তি দেয়।
বছর ২৬+	5+	1500+	প্রতিদিন ৫-১০টি	\$0.3-1	পরিণত অবকাঠামো। মহাকাশ বিদ্যুৎকেন্দ্র ত্বরক ও কক্ষপথের কারখানা চালায়; শক্তির প্রান্তিক খরচ প্রায় শূন্য।

9.10.2. একটি উৎক্ষেপণের খরচ (\$/kg)

প্রতি সময়কালের সূত্র: $C_{kg} = (C_{শক্তি} + C_{রক্ষণাবেক্ষণ} + C_{অবচয়} + C_{পরিচালনা}) / M_{মাল}$, যেখানে:

- $C_{শক্তি}$ হলো শীতলীকরণ ও সহায়ক ব্যবস্থাসহ বিদ্যুতের খরচ।
- $C_{রক্ষণাবেক্ষণ}$ হলো শাটল ও অবকাঠামোর রক্ষণাবেক্ষণ।
- $C_{অবচয়}$ হলো ৩০০ বিলিয়ন ডলারের CAPEX ৫০ বছরে অবচয়।
- $C_{পরিচালনা}$ র মধ্যে কর্মী, সরবরাহ, বীমা ও অন্যান্য পরিচালন ব্যয় রয়েছে।
- $M_{মাল}$ হলো প্রতি উৎক্ষেপণে ১০,০০০ টন উপযোগী মাল।

সময়কালভিত্তিক চূড়ান্ত মান:

সময়কাল	উৎক্ষেপণ/বছর	শক্তি (\$/kg)	রক্ষণাবেক্ষণ (\$/kg)	অবচয় (\$/kg)	পরিচালনা (\$/kg)	মোট খরচ (\$/kg)
বছর ১-২	12	1.8	6.63	50	3.57	62
বছর ৩-৫	50	1	1.25	12	0.67	14.92
বছর ৬-১০	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
বছর ১১-১৫, ২টি লাইন	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
বছর ১৬-২৫, ৩-৪টি লাইন	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
বছর ২৬+, ৫+ লাইন ও মহাকাশ সৌরশক্তি	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. নিরঙ্কুশ অঙ্কে উৎক্ষেপণ খরচের কাঠামো

প্রতি সময়কালের গড় বছরে, ১০,০০০ টন উপযোগী মাল ধরে:

সময়কাল	উৎক্ষেপণের সংখ্যা	প্রতি উৎক্ষেপণে শক্তি (মিলিয়ন USD)	রক্ষণাবেক্ষণ (মিলিয়ন USD)	অবচয় (মিলিয়ন USD)	পরিচালন ব্যয় (মিলিয়ন USD)	প্রতি উৎক্ষেপণে মোট (মিলিয়ন USD)
বছর ১-২	12	18	66.3	500	35.7	620
বছর ৩-৫	50	10	12.5	120	6.7	149.2
বছর ৬-১০	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
বছর ১১-১৫	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
বছর ১৬-২৫	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2

সময়কাল	উৎক্ষেপণের সংখ্যা	প্রতি উৎক্ষেপণে শক্তি (মিলিয়ন USD)	রক্ষণাবেক্ষণ (মিলিয়ন USD)	অবচয় (মিলিয়ন USD)	পরিচালন ব্যয় (মিলিয়ন USD)	প্রতি উৎক্ষেপণে মোট (মিলিয়ন USD)
বছর ২৬+	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. হিসাবের প্রধান অনুমান

- শক্তি:** প্রথম দিকে ০.০৫ মার্কিন ডলার/kWh; বছর ২৬+ এ মহাকাশ সৌরবিদ্যুৎ ও নিজস্ব ভূতাপীয় ক্ষমতায় ০.০০৫ ডলার/kWh হয়।
- রক্ষণাবেক্ষণ:** পরীক্ষামূলক পর্যায়ে মেরামত, সমন্বয় ও অতিরিক্ত কর্মীর কারণে বেশি; দশম বছরে স্বয়ংক্রিয় ধারাবাহিক রক্ষণাবেক্ষণ হয়।
- অবচয়:** ৩০০ বিলিয়ন ডলার CAPEX ৫০ বছরে ভাগ করলে বছরে ৬ বিলিয়ন। বছরে ২৫০ উৎক্ষেপণে প্রতিটি ২৪ মিলিয়ন। অন্য আয় বাদ না দেওয়া এটি রক্ষণশীল হিসাব। বিকল্পভাবে বার্ষিক ৬ বিলিয়ন পুনরুদ্ধারকে নতুন StarRoad শাখায় ক্রমবর্ধমান বিনিয়োগ ধরা যায়।
- মহাকাশভিত্তিক সৌরবিদ্যুৎ কেন্দ্র:** ১৬তম বছর থেকে কক্ষপথের কারখানা ও ত্বরকের অংশে শক্তি দেয়, শক্তির খরচ কমায়ে এবং বিক্রয় আয় বহুগুণ বাড়ায়।

9.10.5. সমন্বিত বিবর্তন: আয় ও খরচ

সময়কাল	উৎক্ষেপণ/বছর	বাজারের গড় মূল্য (\$/kg)	উৎক্ষেপণ আয় (বিলিয়ন USD/বছর)	খরচ (বিলিয়ন USD/বছর)	মোট মুনাফা (বিলিয়ন USD/বছর)
বছর ১-২	12	\$100	12	7.44	4.56
বছর ৩-৫	50	\$39	19.5	7.45	12.04
বছর ৬-১০	250	\$9.6	24	7.8	16.2
বছর ১১-১৫	600	\$3.9	23.4	7.76	15.64
বছর ১৬-২৫	1200	\$1.6	19.2	7.44	11.76
বছর ২৬+	2000	\$0.5	10	6.75	3.25

দ্রষ্টব্য: ভূতাপীয় শক্তি বিক্রির বার্ষিক ৩৫-৪৪ বিলিয়ন ডলার সারণিতে নেই। এই আলাদা আয় অবকাঠামোর অবচয় ও পরিচালন ব্যয় মেটায়।

9.10.6. খরচের বিবর্তনের সিদ্ধান্ত

StarRoad ভূস্থির কক্ষপথ ও তার বাইরে ৮০-১২০ মার্কিন ডলার/kg দিয়ে শুরু করে—নিম্ন কক্ষপথে Falcon Heavy-এর ১,৪০০ ডলার/kg-এর চেয়ে ১০-১৫ গুণ সস্তা এবং Starship-এর ২০০ ডলার/kg লক্ষ্যের তুলনীয়। দশম বছরে ১০, পঁচিশতম বছরে ১ এবং প্রায় ত্রিশতম বছরে ৫+ লাইন ও মহাকাশ সৌরশক্তিতে ০.৫ ডলার/kg-এর নিচে নামে। ফলে সৌরশক্তি ও গ্রহাণুর ধাতু পৃথিবীর শিল্পে অর্থনৈতিকভাবে ব্যবহারযোগ্য হয়।

মূল সিদ্ধান্ত: পরীক্ষামূলক পর্যায়েও StarRoad প্রতিযোগিতামূলক। পরিসর বৃদ্ধি ও মহাকাশ সৌরশক্তির সমন্বয় ৩০ বছরে দাম দুই মাত্রাক্রম কমায়ে।

9.11. বিকল্পের সঙ্গে তুলনা

প্রকল্প	ধরন	বিনিয়োগ (CAPEX / গবেষণা)	ফেরতকাল	খরচ / LCOE	মন্তব্য
StarRoad শক্তি অংশ: ভূতাপীয় ব্যবস্থা + সঞ্চয়	শক্তি	১০০-১৫০ বিলিয়ন মার্কিন ডলার	শক্তি বিক্রিতে ৫-৭ বছর	০.০৫ মার্কিন ডলার/kWh	শুধু ভূতাপীয় উৎপাদন ও সঞ্চয়। স্বতন্ত্র শক্তি প্রকল্প হিসেবে বিনিয়োগ ফেরত দেয়।
StarRoad পরিবহন অংশ: টানেল, প্রবেশপথ ও শাটল	পরিবহন	১৫০-২০০ বিলিয়ন মার্কিন ডলার	মালবাহী আয়সহ ৮-১২ বছর	১-১০ মার্কিন ডলার/kg	ত্বরক, প্রবেশপথ ও শাটল। মাল পরিবহনে বিনিয়োগ ফেরত দেয় এবং প্রথম অংশের শক্তি ব্যবহার করে।
সম্পূর্ণ StarRoad ব্যবস্থা	শক্তি + পরিবহন	প্রায় ৩০০ বিলিয়ন মার্কিন ডলার	সম্মিলিত আয়ে ৮-১২ বছর	০.০৫ মার্কিন ডলার/kWh ও ১-১০ মার্কিন ডলার/kg	শক্তি ও মাল—দুই উৎসের আয়সহ সমন্বিত প্রকল্প।

প্রকল্প	ধরন	বিনিয়োগ (CAPEX / গবেষণা)	ফেরতকাল	খরচ / LCOE	মন্তব্য
Falcon Heavy, উন্নয়ন	পরিবহন	গবেষণায় প্রায় ৫ বিলিয়ন মার্কিন ডলার	বাণিজ্যিক হারে প্রায় ১০-১৫ বছর	প্রায় ১,৪০০ মার্কিন ডলার/kg	চলমান রকেট। এখানে CAPEX অবকাঠামো নয়, উন্নয়ন ব্যয়।
Starship, উন্নয়ন	পরিবহন	গবেষণায় প্রায় ১০ বিলিয়ন মার্কিন ডলার	লক্ষ্যবাজার হলে প্রায় ১০-১৫ বছর	লক্ষ্য ২০০ মার্কিন ডলার/kg; সম্ভাব্য ৫০-১০০ ডলার/kg	উন্নয়নশীল। বিনিয়োগ স্থায়ী অবকাঠামোয় নয়, গবেষণায়।
গ্র্যান্ড ইঙ্গা জলবিদ্যুৎ, গণতান্ত্রিক কঙ্গো প্রজাতন্ত্র	শক্তি	৮০-১০০ বিলিয়ন মার্কিন ডলার	১৫-২৫ বছর	০.০৩-০.০৫ মার্কিন ডলার/kWh	বিশাল জলবিদ্যুৎ কেন্দ্র; শুধু শক্তি।
বড় পারমাণবিক কেন্দ্র, ২টি ইউনিট ও প্রায় ২.৪ GW	শক্তি	১৫-২০ বিলিয়ন মার্কিন ডলার	২০-৩০ বছর	০.০৫-০.০৮ মার্কিন ডলার/kWh	সাধারণ পারমাণবিক কেন্দ্র; শুধু শক্তি।

9.12. অর্থনৈতিক সিদ্ধান্ত

মডেলটি দেখায়, প্রায় ৩০০ বিলিয়ন মার্কিন ডলারের মধ্যম CAPEX-এ StarRoad বাস্তবায়নযোগ্য। প্রধান কারণ:

- ৮০-১২০ বিলিয়ন ডলারের ভূতাপীয় ব্যবস্থা সবচেয়ে ব্যয়বহুল, তবে স্বতন্ত্র শক্তি প্রকল্প হিসেবে ৫-৭ বছরে বিনিয়োগ ফেরত দেয়।
- ৭৭-১২৫ বিলিয়ন ডলারের টানেল খনন ধারাবাহিক খননযন্ত্র ও নিজস্ব উৎপাদনে প্রযুক্তিগতভাবে সম্ভব।
- ২৩-৪২ বিলিয়ন ডলারের সঞ্চয় ১২৫ ডলার/kWh-এ নামা BESS মূল্য ও বিশ্বের সেরা চর্চাভিত্তিক মাধ্যাকর্ষণ ব্যবস্থার ওপর নির্ভরশীল।
- ০.১-৩ বিলিয়ন ডলারের গবেষণা বাস্তব নমুনা তৈরির খরচ, পূর্ণমাত্রার নির্মাণ নয়।

অর্থনৈতিক আকর্ষণ: ০.০৫ ডলার/kWh দরে StarRoad শুধু শক্তি বিক্রিতেই বছরে ৩৫-৪৪ বিলিয়ন ডলার আয় করে। এতে পরিচালন ব্যয় মেটে এবং পূর্ণমাত্রার মহাকাশ উৎক্ষেপণের আগেই শক্তি রপ্তানির মাধ্যমে মূলধন ফেরত আসে।

১০. নিরাপত্তা ও জরুরি পরিচালন পদ্ধতি

StarRoad এমন চরম ব্যর্থতা-সহনশীল পরিচালন নীতিতে নকশা করা, যেখানে কোনো একটি—এমনকি প্রায়ই একাধিক—উপাদান ব্যর্থ হলেও বিপর্যয় ঘটে না। ভৌত অতিরিক্ততা, কাজের বিভাজন এবং প্রস্তুতি থেকে উদ্ভয়ন পর্যন্ত পুরো চক্রের বহুস্তরীয় প্রোটোকল নিরাপত্তা নিশ্চিত করে।

10.1. নিরাপত্তার মূলনীতি: একটি মাত্র ত্রুটিও যেন প্রাণঘাতী না হয়

- গুরুত্বপূর্ণ ব্যবস্থায় একাধিক বিকল্প। শাটলের অভ্যন্তরীণ রিঅ্যাক্টর, ত্বরক-থণ্ডের বিদ্যুৎ সরবরাহ এবং প্রবেশপথের জেট-রিংসহ প্রধান উপাদানে তিন বা চার স্তরের স্বতন্ত্র বিকল্প রাখা হয়।
- খণ্ডায়ন ও বিচ্ছিন্নকরণ। সুড়ঙ্গটি ৫০-২০০ কিমি দীর্ঘ স্বয়ংসম্পূর্ণ খণ্ডে ভাগ করা; প্রতিটির আলাদা বিদ্যুৎ ও শূন্যস্থান ব্যবস্থা এবং খণ্ডগুলোর মাঝখানে জরুরি যান্ত্রিক দরজা রয়েছে। পাশের খণ্ডে শূন্যস্থান নষ্ট হলে সেখানে শাটল না থাকলেই কেবল দরজা বন্ধ হয়, ফলে ধারাবাহিক বিপর্যয় ছড়ায় না।
- সক্রিয় ও নিষ্ক্রিয় চৌম্বক ভাসমানতা নিয়ন্ত্রণ। স্থিতিশীলতা ও ভারসাম্যহীনতা সামলানোর মূল ব্যবস্থা শাটলের ভেতরেই থাকে। বিশাল অতিপরিবাহী লুপ এবং অভ্যন্তরীণ বিদ্যুৎ ইউনিট মাইক্রোসেকেন্ডের মধ্যে শক্তি পুনর্বণ্টন করে ভূমিভিত্তিক ব্যবস্থার স্থানীয় ত্রুটি প্রতিহত করে। অতিধ্বনি বাঁকে শাটলের উপবৃত্তাকার প্রস্থচ্ছেদ ও কেন্দ্রাতিগ বল নির্দেশক পৃষ্ঠের সাপেক্ষে তাকে আরও স্থিতিশীল রাখে।
- শাটল ও যাত্রীদল সবার আগে। উৎক্ষেপণের সময় জরুরি অবস্থা হলে সুড়ঙ্গের কোনো সীমিত অংশ ক্ষতিগ্রস্ত হলেও প্রোটোকল শাটল রক্ষাকেই অগ্রাধিকার দেয়।

10.2. প্রধান ঝুঁকি ও প্রতিরক্ষা ব্যবস্থা

ঝুঁকি	কারণ	প্রতিরক্ষা ও প্রোটোকল
অতিধ্বনি গতিতে ভাসমানতা হারানো বা চৌম্বক ক্ষেত্রের অসমতা	বিদ্যুৎ-খণ্ড বিকল হওয়া বা কয়েল ক্ষতিগ্রস্ত হওয়া।	১. ন্যানোসেকেন্ড প্রতিক্রিয়াসম্পন্ন অভ্যন্তরীণ স্থিতিশীলতা ব্যবস্থা। ২. আবেশী ব্রেকিং: অতিধ্বনি গতিতে শাটল সুড়ঙ্গের নিষ্ক্রিয় কয়েলে বিদ্যুৎ প্রবাহ সৃষ্টি করে, যা স্থিতিশীলতার বল তৈরি করে। ৩. খণ্ডায়ন সংঘর্ষ ও ক্ষতি একটি খণ্ডেই সীমাবদ্ধ রাখে।

ঝুঁকি	কারণ	প্রতিরক্ষা ও প্রোটোকল
প্রবেশপথের গ্যাস-গতীয় বাধা বিকল হওয়া	এক বা একাধিক জেট-রিং বিকল হওয়া।	১. তিনটি বিকল্প রিংয়ের ব্যবস্থা, প্রতিটি রিংয়ের চারপাশে বিস্তারণ -প্রতিরোধী সুরক্ষা। ২. উৎক্ষেপণের ৬০ সেকেন্ড আগে পরীক্ষায় মূল শাটার না খুলেই গ্যাস-শঙ্কু তৈরি হয়; ত্রুটিপূর্ণ রিং বিচ্ছিন্ন করা হয়। ৩. যেকোনো ত্রুটিতে Alarm-1 উৎক্ষেপণ বাতিল করে।
সুড়ঙ্গের শূন্যস্থান নষ্ট হওয়া	দুর্ঘটনা বা ক্ষতির কারণে চাপ বেড়ে যাওয়া।	১. পুরো সুড়ঙ্গজুড়ে চাপ-সংবেদকের নেটওয়ার্ক । ২. ক্ষতি আটকে রাখতে খণ্ডগুলোর মাঝখানে জরুরি দরজা। ৩. শাটলের সামনে চাপ বৃদ্ধির লক্ষণ মিললে স্বয়ংক্রিয় জরুরি-থামা প্রোটোকল—Alarm-1 বা Alarm-2।
থামা অসম্ভব হয়ে যাওয়ার পর ত্রুটি ধরা পড়া	ত্বরণপথের শেষ ৬০-১০০% অংশে গুরুতর ত্রুটি শনাক্ত হওয়া।	Alarm-3: সর্বোচ্চ ৪g পর্যন্ত ব্রেকিং করে গতি কমানো হয়। প্রবেশপথ হারালেও শাটলকে উপকক্ষপথে পাঠানো অগ্রাধিকার পায়। পরে নিরাপদে সাগরে নামার জন্য যানটি হালকা করতে পেলোড বিচ্ছিন্ন করা হয়।

10.3. জরুরি প্রোটোকলের ক্রম

- **Alarm-1, উৎক্ষেপণ-পূর্ব জরুরি অবস্থা।** শাটল চলার আগে শূন্যস্থান হারানো, চৌম্বক ক্ষেত্রের ত্রুটি, প্রবেশপথের কোনো রিং বিকল হওয়া বা গ্যাস-শঙ্কু অস্বাভাবিকভাবে গঠিত হওয়া ধরা পড়লে এটি সক্রিয় হয়। **ব্যবস্থা:** সঙ্গে সঙ্গে উৎক্ষেপণ বাতিল, দরজা দিয়ে ত্রুটিপূর্ণ সুড়ঙ্গ-খণ্ড বিচ্ছিন্ন, তারপর পরীক্ষা ও মেরামত।
- **Alarm-2, পথের শুরু বা মাঝামাঝি জরুরি অবস্থা, ০-৬০%।** যাত্রা শুরুর পর সামনে কোনো ত্রুটি ধরা পড়লে এটি সক্রিয় হয়। ব্যবস্থা: জরুরি ব্রেকিং করে সুড়ঙ্গের ভেতরে থামা। ত্রুটি সামনে থাকলে শাটল নিজ শক্তিতে সূচনাবিন্দুতে ফিরে যায়। অন্যথায় থামার পর বর্তমান খণ্ডে দরজা দিয়ে তাকে বিচ্ছিন্ন করা হয়; খণ্ডে বাতাস ভরে যাত্রীদলকে পরিষেবা সুড়ঙ্গ ও ভূপৃষ্ঠমুখী শ্যাফট দিয়ে সরিয়ে নেওয়া হয়।
- **Alarm-3, পথের শেষ ভাগের জরুরি অবস্থা, ৬০-১০০%।** সুড়ঙ্গে থামা অসম্ভব এবং প্রবেশপথ বা শেষ খণ্ড বিকল হওয়ার আশঙ্কা থাকলে এটি সক্রিয় হয়। **ব্যবস্থাগুলো:**
 - ১) গতি কমাতে সর্বোচ্চ জরুরি ব্রেকিং, ৪g পর্যন্ত।
 - ২) শাটলের কাঠামোগত অখণ্ডতা সবার আগে; প্রবেশপথ খোলা থাকে।
 - ৩) জরুরি উপকক্ষপথে প্রবেশ এবং যান হালকা করতে পথের সর্বোচ্চ বিন্দুতে মাল বিচ্ছিন্ন করা।
 - ৪) সব প্রধান ও বিকল্প ব্যবস্থা ব্যবহার করে ভারত বা প্রশান্ত মহাসাগরের নির্ধারিত এলাকায় অবতরণ। শাটলের কাঠামো অতিরিক্ত ত্বরণ এবং প্রবেশপথের আংশিক ধ্বংস সহ্য করার উপযোগী করে তৈরি।

10.4. টিকে থাকার জন্য কাঠামোগত ব্যবস্থা

- **শাটল।** ভবিষ্যতের দীর্ঘতর সংস্করণে দুটি স্বাধীন অভ্যন্তরীণ রিঅ্যাক্টর; বিস্তৃত অতিপরিবাহী ভাসমানতা ব্যবস্থা; এবং চরম চাপ ও তাপীয় অভিঘাত সহ্যকারী শক্তিশালী কাঠামো।
- **উচ্চভূমির বায়ুমণ্ডলীয় প্রবেশপথ।** বিস্তারণ-প্রতিরোধী আবরণে তিনটি স্বাধীন বলয়াকার জেট ইঞ্জিন। যান্ত্রিক শাটার আংশিকভাবে বিদ্রিত গ্যাস-বাধার অভিঘাত তরঙ্গ সহ্য করতে পারে। প্রবেশপথের ভেতরের দেয়ালে ফানেল-আকৃতির হিঁদ সঙ্গে সঙ্গে চাপ কমিয়ে গ্যাস নিষ্ক্রিয়ভাবে বিকল্প শূন্যস্থান কক্ষে বের করে দেয়। এগুলো সুড়ঙ্গ ও প্রবেশপথে বায়ুমণ্ডলীয় গ্যাস ঢোকা কমায়, পুরো প্রবেশপথ ব্যবস্থা বিকল হলেও ক্ষতি সীমিত রাখে এবং অতিধ্বনি শাটলের চাপ-স্পন্দনে কাঠামো ফেটে যাওয়া ঠেকায়।
- **সুড়ঙ্গ।** খণ্ডায়ন, জরুরি দরজা, দ্বৈত বিদ্যুৎ ব্যবস্থা এবং জরুরি সরিয়ে নেওয়া ও মেরামতের জন্য কারিগরি পরিষেবা সুড়ঙ্গ।

10.5. শব্দ ও অভিঘাত তরঙ্গের প্রভাব

অতিধ্বনি গতিতে বের হওয়া শাটল শক্তিশালী N-তরঙ্গের সোনিক বুম তৈরি করে। তরঙ্গের অধিকাংশ শক্তি পথ বরাবর সরু অঞ্চলে চলে, ফলে প্রবেশপথের কাছের ভূমিভিত্তিক অবকাঠামোতে প্রভাব কমে। তবু এর চারপাশে একটি বন্ধ স্বাস্থ্য-সুরক্ষা এলাকা রাখা হয়; মডেলিংয়ে তার ব্যাসার্ধ নির্ধারণ এবং পূর্ণমাত্রার পরীক্ষায় তা নিশ্চিত করা হয়। ভূপৃষ্ঠে গ্রহণযোগ্য প্রভাবের জন্য সর্বোচ্চ অতিচাপ Δp -এর দুটি সীমা নির্ধারিত:

$\Delta p \leq 2 \text{ psf}$, প্রায় 96 Pa: ভবন ও কাচ ক্ষতিগ্রস্ত হওয়ার আশঙ্কা নগণ্য বলে ধরা হয়।

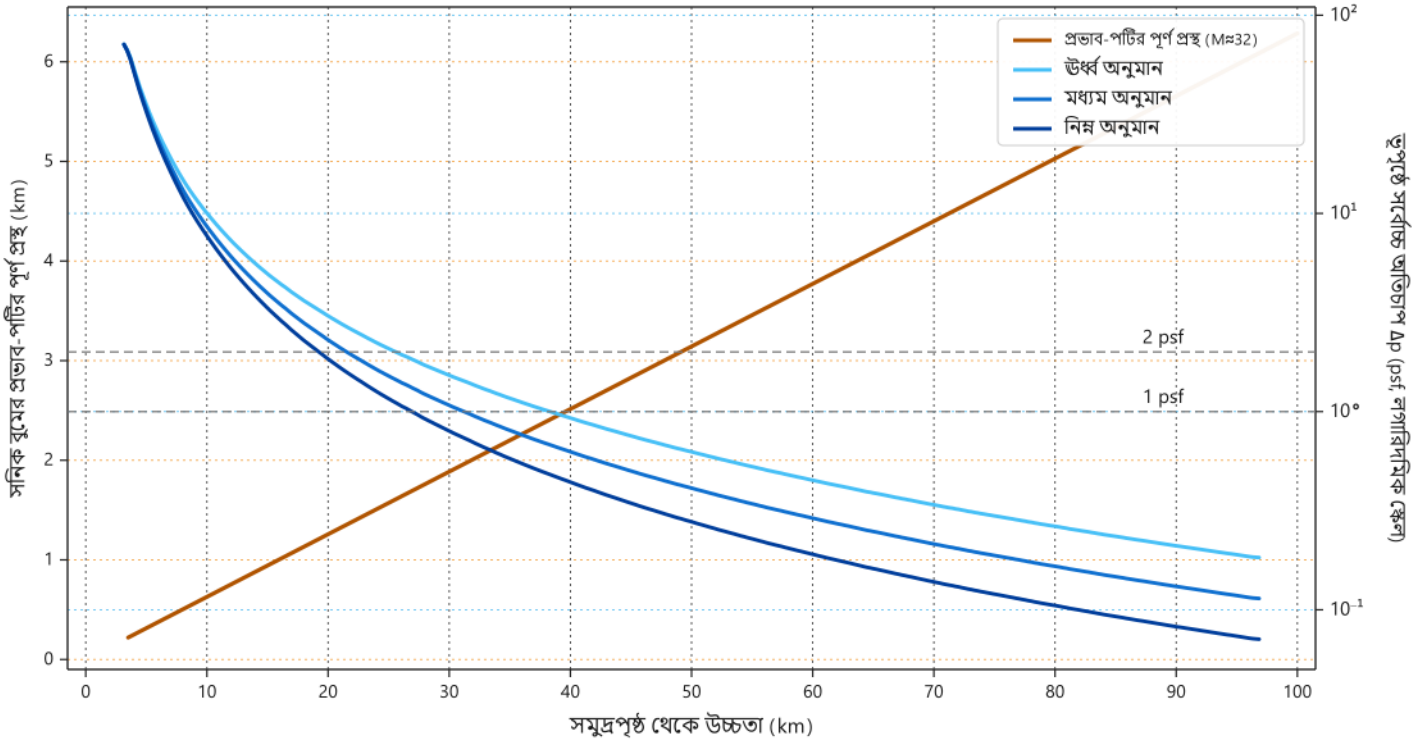
$\Delta p \leq 1 \text{ psf}$, প্রায় 48 Pa: জনবসতিপূর্ণ এলাকার লক্ষ্য; অভিযোগের ঝুঁকি ন্যূনতম এবং কোনো ক্ষতি নয়।

রুটের নকশা ও পরিচালন সীমা—নিষিদ্ধ করিডর, উপযোগী আবহাওয়ার সময় এবং উচ্চতার বিধিনিষেধ—এমন নিরাপত্তা ব্যবধান রেখে ঠিক করা হয় যাতে এই সীমাগুলো নিশ্চিত থাকে।

StarRoad: উচ্চতার সঙ্গে সনিক বুমের প্রভাব-পটীর প্রস্থ ও অতিচাপ

Δp -এর আনুমানিক পরিসর (স্পেস শাটলের তথ্য দিয়ে ক্যালিব্রেট করা)

সব গণনায় Mach $M \approx 32$ এবং অভিঘাত-তরঙ্গের বিস্তার কোণ $\mu \approx 1.8^\circ$ ধরা হয়েছে



উপসংহার: StarRoad-এর নিরাপত্তা এই বিশ্বাসের ওপর দাঁড়ায় না যে ক্রটি ঘটতেই পারে না। প্রতিটি ক্রটির ধরনকে সম্ভাব্য ধরে তার জন্য আগে থেকেই স্বয়ংক্রিয় প্রতিক্রিয়া নির্ধারণ করা হয়। এভাবেই ধারণাটি কাল্পনিক পথ থেকে সুচিত্তিত, নির্ভরযোগ্য এবং সর্বোপরি আস্থাযোগ্য প্রকৌশল ব্যবস্থায় পরিণত হয়।

১১. সাংস্কৃতিক ও মনস্তাত্ত্বিক প্রভাব

প্রযুক্তিগত ও অর্থনৈতিক প্রভাবের বাইরে StarRoad সংস্কৃতি ও মানবজাতির সামষ্টিক চেতনায় গভীর প্রভাব ফেলবে। প্রতিটি উৎক্ষেপণ প্রযুক্তিগত কাজ থেকে বিশাল জনসমাগমের, প্রায় পবিত্র ঘটনায় রূপ নেবে।

11.1. একটি ঘটনা হিসেবে দৃশ্য

শাটলের হাইপারসনিক নির্গমন মানুষের তৈরি অনন্য জ্যোতির্বেজ্ঞানিক ঘটনা—‘সৌর তীর’—সৃষ্টি করবে। নিরাপদ স্থান থেকে দিগন্তে মুহূর্তের বলক, তারপর আকাশে সোজা রেখা আঁকা উজ্জ্বল প্লাজমা-চিহ্ন দ্রুত ওপরে উঠতে দেখা যাবে। কয়েক দশ সেকেন্ড পরে ইঞ্জিনের পরিচিত গর্জনের বদলে ধ্বংসাত্মক দ্বৈত সনিক বুম আসবে—যেন একটি যন্ত্র নয়, সম্পূর্ণ উড়ন্ত শহর শব্দ ও তাপের বাধা পার হচ্ছে। রাতের উৎক্ষেপণ চলমান ধূমকেতুর মতো ভূদৃশ্য আলোকিত করবে এবং কৃত্রিম প্রযুক্তিগত মেরুজ্যোতির মতো দেখাবে।

11.2. মনস্তাত্ত্বিক ও প্রতীকী অনুরণন

- **দৃশ্যমান মাত্রা**। বিমূর্ত মহাকাশ কর্মসূচি শত শত কিমি দূর থেকে দেখা দৈনিক বা সাপ্তাহিক দৃশ্য হয়ে মহাকাশ বিস্তারকে চার্ট থেকে জীবনের বাস্তব **সত্যে রূপ** দেয়।
- **নতুন আদিরূপ**। পৃথিবী থেকে মহাকাশে ছোড়া বিশাল আলোকিত তীর অগ্রগতি, ইচ্ছা ও আকাঙ্ক্ষার শক্তিশালী প্রতীক হবে। জনপ্রিয় সংস্কৃতিতে পুরোনো খাড়া রকেটকে সরিয়ে মহাকাশ পরিবহন **করিডরের যুগের প্রতীক** হবে।
- **ঐক্য ও গর্ব**। Soyuz ও Apollo উৎক্ষেপণ যেমন একসময় বিশ্বকে পর্দার সামনে এনেছিল, নিয়মিত StarRoad যাত্রা বৃহৎ লক্ষ্যে মানব সহযোগিতার ক্ষমতা দেখানো বৈশ্বিক গণমাধ্যম ঘটনা হবে।

11.3. সামাজিক-অর্থনৈতিক ফলাফল

- **পর্যটন। নিষিদ্ধ এলাকার** নিরাপদ সীমানায় বিশেষ দর্শনকেন্দ্র নতুন মহাকাশ পর্যটনের কেন্দ্র হবে। উৎক্ষেপণ দেখা প্রাচীন বিশ্বের বিস্ময় দর্শনের মতো আকর্ষণীয় হতে পারে।
- **শিক্ষার প্রেরণা**। এই দৃশ্য পেশাগত অনুপ্রেরণার অতুলনীয় মাধ্যম হয়ে লক্ষ লক্ষ শিশুকে পদার্থবিদ্যা, প্রকৌশল ও মহাকাশযানবিদ্যা শিখতে উৎসাহ দেবে।
- **মহাকাশের রহস্যমোচন**। নিয়মিত, পূর্বানুমেয় ও শিল্পভিত্তিক উৎক্ষেপণ মহাকাশযাত্রা থেকে ব্যতিক্রমিতা ও মরণঝুঁকির আবহ সরিয়ে একে বিশাল **হলেও স্বাভাবিক রসদ কার্যক্রম হিসেবে** দেখাবে।

অতএব StarRoad মহাকাশে যাওয়ার ভৌত অবকাঠামোর পাশাপাশি মানবজাতির **নতুন ভূমিকা—নিজের দোলনার বাইরে ভবিষ্যৎ** গড়া সভ্যতা—গ্রহণের জন্য প্রয়োজনীয় সাংস্কৃতিক কাহিনি ও আবেগগত ভিত্তি তৈরি করবে। সৌর তীরের নিয়মিত আবির্ভাব মনে করাবে, নক্ষত্রের পথ শুধু খোলা নয়, ব্যবহৃতও হচ্ছে।

১২. উপসংহার

StarRoad শুধু প্রকৌশল মহাপ্রকল্প নয়। এটি শিল্পভিত্তিক মহাকাশসভ্যতায় রূপান্তরের কৌশল। ‘রকেট’ দৃষ্টান্ত থেকে ‘করিডর’ দৃষ্টান্তে গিয়ে প্রকল্পটি দুটি প্রধান বাধা—পণ্য পরিবহন ব্যয় ও কম পরিবহন সক্ষমতা—অতিক্রমের পথ দেয়।

অতিধ্বনিক করিডর শক্তি, কৃষি, শিল্প, সরবরাহ এবং মহাকাশ প্রযুক্তিকে যুক্ত করা মেরুদণ্ড হয়। আফ্রিকাও শুধু কাঁচামাল রপ্তানি না করে নিজের ভূগোল ও সম্পদ দিয়ে মহাকাশের পথ নির্মাণ করে শিল্প ও প্রযুক্তিতে বড় অগ্রগতির সুযোগ পায়।

প্রমাণিত প্রযুক্তিকে সমন্বিত ও বৃহৎ করে StarRoad এমন অর্থনীতির ভিত্তি গড়ে, যেখানে সৌরজগতের সম্পদ পৃথিবীর সমস্যা সমাধানে ব্যবহার করা যায় এবং অবকাঠামো নিজেই মানবজাতির ভবিষ্যতের বীমা ও অগ্রযাত্রার মঞ্চ হয়। বাস্তবায়নে নজিরবিহীন আন্তর্জাতিক সহযোগিতা, দীর্ঘমেয়াদি বিনিয়োগ ও প্রকৌশল দৃঢ়তা লাগবে; প্রতিদান হবে সত্যিকারের মহাকাশ যুগের চাবি, প্রায় সীমাহীন পৃথিবী-বহির্ভূত সম্পদ এবং প্রাচুর্যময় শক্তি।