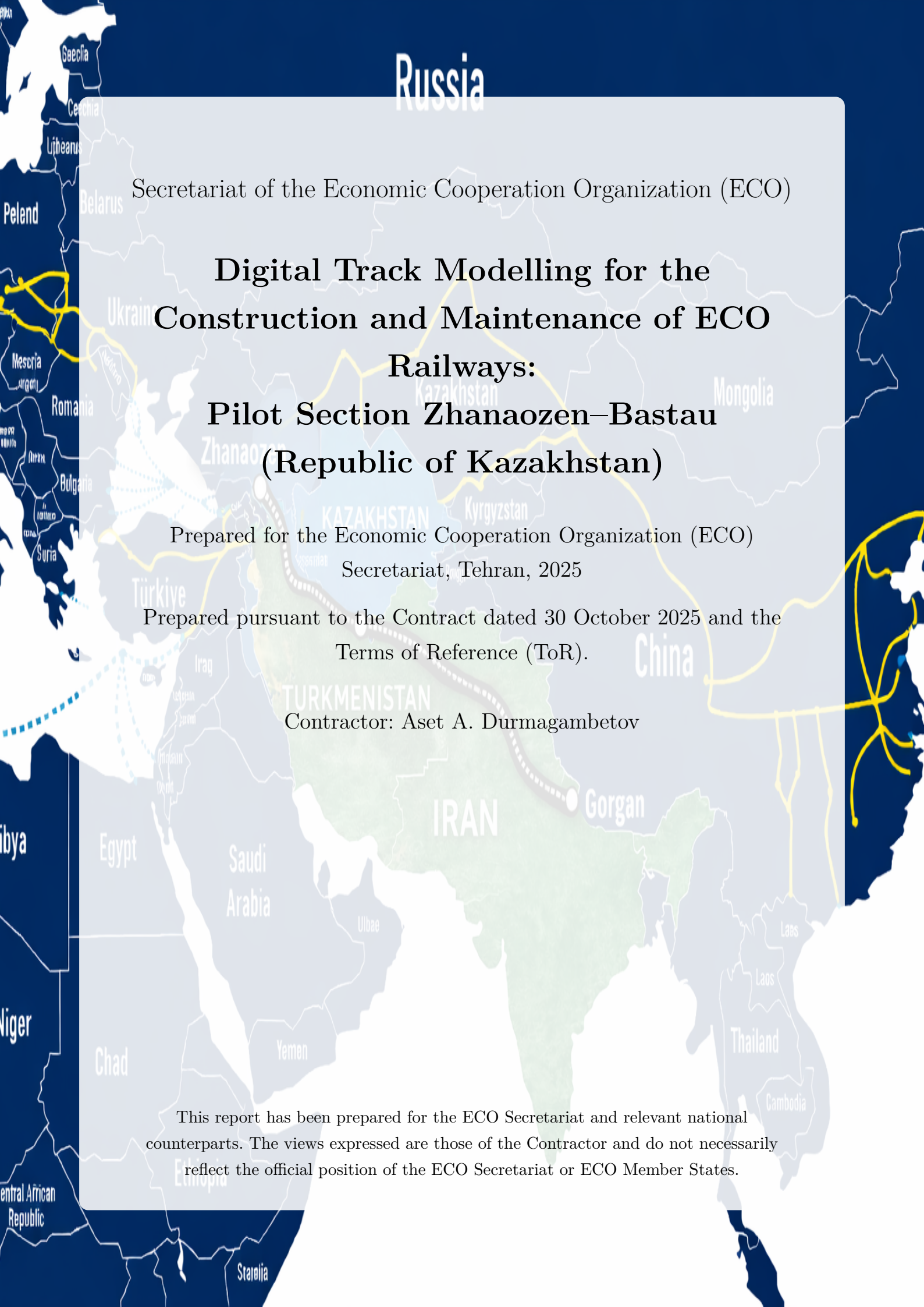


Table of Contents

Digital Railway Modelling - English Version	2
Digital Railway Modelling Presentation	41
Digital Railway Modelling - Russian Version	61



Russia

Secretariat of the Economic Cooperation Organization (ECO)

Digital Track Modelling for the Construction and Maintenance of ECO Railways: Pilot Section Zhanaozen–Bastau (Republic of Kazakhstan)

Prepared for the Economic Cooperation Organization (ECO)
Secretariat, Tehran, 2025

Prepared pursuant to the Contract dated 30 October 2025 and the
Terms of Reference (ToR).

Contractor: Aset A. Durmagambetov

This report has been prepared for the ECO Secretariat and relevant national counterparts. The views expressed are those of the Contractor and do not necessarily reflect the official position of the ECO Secretariat or ECO Member States.

Executive Summary

The pilot project on Digital Track Modelling (DTM) for the Zhanaozen–Bastau section of the Kazakhstan–Turkmenistan–Iran (KTI) corridor confirms that the deployment of a fit-for-purpose digital track model is technically feasible and economically justified under ECO conditions. The Interim Report of the Study was reviewed by ECO Member States, with feedback received from the Turkmen and Iranian sides. The Turkmen side confirmed the use of a Russian technical solution, while the Iranian side indicated that an outdated Austrian solution is currently in operation and does not fully meet modern digitalisation requirements. In this context, Iranian Railways expressed interest in a more comprehensive follow-up Study with an expanded scope, which would require an indicative budget on the order of USD 350–500 thousand, potentially with the support of international organisations, development funds and international financial institutions.

The quantitative assessment demonstrates:

- a positive Net Present Value (NPV) across all scenarios considered;
- a payback period of approximately 2–3 years in the Base Case scenario;
- Internal Rates of Return (IRR) broadly consistent with international benchmarks for digital railway and asset management projects.

The pilot confirms that relatively modest investments in digital track modelling can deliver substantial economic and operational benefits. Digital modelling is understood in this Study as an integrated system combining physical measurement infrastructure (hardware) and analytical and decision-support software, supported by appropriate governance and data management arrangements. Such an integrated approach enables significant savings in track maintenance, reduces service disruptions, and supports safer and more reliable operations along strategic regional corridors.

With regard to the hardware component, international experience indicates that modern inspection and diagnostic solutions with competitive total cost of ownership are particularly effective in corridors characterised by heterogeneous track conditions. Solutions widely deployed in large railway systems, including those originating from the PRC, can reduce failure rates and warranty risks for rolling stock and infrastructure assets. This creates favourable conditions for engaging international financing sources, including banks that support export-oriented railway technologies and seek to mitigate operational and lifecycle risks.

The software component of DTM is addressed in the report through a transparent and auditable mathematical framework linking track geometry, dynamic forces,

risk zones and maintenance decisions to economic outcomes. The detailed DTM calculations presented in the Study demonstrate that the approach avoids reliance on opaque or “black-box” solutions and provides a robust basis for engineering and investment decision-making.

The Study also demonstrates the bankability of the proposed approach. ECO Member States already allocate national budget resources for railway construction, rehabilitation and maintenance on an individual basis. By providing a quantified and credible mechanism for cost savings and efficiency gains, DTM creates incentives for coordination and opens the possibility of structuring a syndicated financing facility to support corridor-level digitalisation. Such financing could be mobilised on concessional terms through international development banks and funds, including those aligned with export financing frameworks. The proposed implementation model envisages the development of a minimum viable product (MVP) at corridor level, followed by the establishment of national operators in each participating country, with data processing on national servers to ensure data sovereignty, risk mitigation and reliable debt servicing. At the same time, the approach aligns with standard grant eligibility criteria, including environmental protection, sustainable development, human capital development and public budget efficiency.

This report provides:

- a concise justification of DTM as an enabling tool for ECO railways;
- a reference architecture and minimum technical specification for a Digital Track Model aligned with international good practice and ECO needs;
- an implementation roadmap for the Zhanaozen–Bastau pilot (8 weeks), including governance, milestones and deliverables;
- an economic model linking geometric quality, dynamic forces and maintenance costs;
- an assessment of international experience (SBB, USA/EU, RZD/KTZ, PRC) and its applicability to ECO corridors;
- recommendations on scaling up the approach across ECO Member States, including options for engaging international financial institutions (IFIs) and technology partners.

The Zhanaozen–Bastau pilot is proposed as a demonstration case for:

- integrating engineering-grade geometry data, condition data (PU-32) and operational information in a single digital model;
- demonstrating transparent, auditable and data-driven maintenance and investment decisions;

- supporting the development of an ECO-level standard for digital track modelling and subsequent corridor-wide deployment.

1	Introduction	6
1.1	Context	6
1.2	Basis of the Assignment	6
1.3	Object of Analysis	7
1.4	Source Materials	7
2	Relevance and Strategic Rationale	7
2.1	Macroeconomic Perspective	7
2.2	Alignment with ECO and Global Agendas	8
3	Objectives and Scope of Work	9
3.1	Overall Objective	9
3.2	Specific Tasks	9
4	Methodology	9
4.1	Analytical Approach	9
4.2	Data and Quality Control	10
5	Review of the Interim Report by ECO Member States	10
6	International Experience with Digital Track Modelling	11
6.1	Comparative Overview	11
6.2	Key Lessons for ECO	11
7	Assumptions and Constraints	12
8	Implementation Plan for the Pilot (8 Weeks)	13
9	Economic Model: CAPEX, OPEX, NPV and IRR	13
9.1	Cost Structure	14

9.2	Scenarios (5-year Horizon, 10% Discount Rate)	14
9.3	10-year Performance	14
9.4	Illustrative Plots	15
10	DTM Architecture and Technical Requirements	16
10.1	Logical Architecture	16
10.2	Data Protection and Access Control	16
10.3	Key Non-Functional Requirements	16
10.4	V&V Metrics	16
11	Governance, Risks and Change Management	17
11.1	Steering Group	17
11.2	Risk Register	17
12	Pilot Section Characteristics	18
12.1	Technical Parameters	18
12.2	Engineering Structures (Excerpt)	18
13	Theoretical Framework: Geometry and Cost Relationship for the Zhanaozen–Bastau Pilot Section	19
13.1	Relationship Between Loads, Curvature and Maintenance Costs	20
13.2	Model of the Impact of Curvature Error on Additional Costs	21
13.3	Evaluation via Mid-Chord Offset and Choice of Target Accuracy for the DTM	22
13.4	Interpretation for the ECO Pilot Project	23
14	Extended Analysis of Curvature, Cant and Transition Curves	24
14.1	Curvature Analysis	24
14.2	Cant Analysis	24
14.3	Transition Curves	24
15	Illustrative Charts (pgfplots)	25
16	Comparative Options for Phase 2 Implementation	26
16.1	Key Evaluation Criteria	27

16.2	Option A: GE + Infotrans Configuration	27
16.3	Option B: CRRC + Local Solution	28
16.4	Indicative Comparative Matrix	29
16.5	Indicative Comparative Matrix	29
16.6	Recommended Approach for ECO	30
17	Implementation Modality and Payment Schedule	31
18	Contractor Requirements	31
19	Expert Assessment of the Pilot Section and Key Recommendations	32
19.0.1	Institutional and Governance Preconditions	32
A	Compliance with ToR Requirements and KPIs	33
A.1	Application of SWOT Analysis	33
A.2	Application of SMART Criteria	34
A.3	Economic Assessment: CAPEX and OPEX	36
A.4	Key Performance Indicators (KPIs) Compliance	36
B	References	36
C	Register of Source Materials	37
D	Glossary	38

1. Introduction

1.1 Context

This report has been prepared in accordance with the approved Terms of Reference and is structured to ensure clarity, transparency, and compliance with internationally accepted reporting practices.

The Terms of Reference comprise five principal items. The present report provides a detailed analysis and substantiation of the first four items of the Terms of Reference. The fifth item is delivered in the form of presentation materials, which are provided as a standalone presentation and serve to complement the report by offering a concise and visual summary of the key findings, assumptions, and conclusions.

Such a separation between the analytical report and the presentation materials is consistent with international best practices for technical and feasibility studies, ensuring both methodological rigor and effective communication of results to decision-makers.

ECO Member States are investing heavily in rail infrastructure to support regional connectivity, trade facilitation and diversification of transit routes. At the same time, fiscal space is constrained, and infrastructure managers are expected to:

- reduce lifecycle costs;
- improve safety and reliability;
- integrate with digital trade and transport systems.

Digital Track Modelling (DTM) is a practical, technically mature instrument to achieve these goals. Unlike purely conceptual “digital twin” narratives, the proposed DTM approach focuses on:

- accurate representation of track geometry and associated assets;
- systematic linkage to diagnostics and maintenance history;
- transparent economic evaluation of maintenance strategies.

1.2 Basis of the Assignment

The assignment is based on:

- Contract between ECO Secretariat and the Contractor dated 30 October 2025;
- Terms of Reference: Study on Digital Modelling for ECO Railways (2025);
- decisions and recommendations of relevant ECO bodies (RPC, TTCC, PMG).

The DTM pilot on Zhanaozen–Bastau is designed as a low-cost, high-demonstration

value project to illustrate the benefits of data-driven maintenance and planning in a realistic operational context.

1.3 Object of Analysis

The primary object is the Zhanaozen–Bastau section (operational length approx. 35 km), part of the KTI transport corridor. For modelling and scalability, the 35 km perimeter is considered in line with the ToR requirement (geographic perimeter up to 35 km).

1.4 Source Materials

Key inputs include:

- KTZ datasets: geometry, PU-32 forms, lists of engineering structures, technical parameters;
- ECO Secretariat documentation and ToR;
- international references and technical papers on digital track modelling.

The terrain analysis demonstrates that the KTI railway corridor predominantly crosses flat and mildly undulating areas. This represents a significant competitive advantage compared to alternative ECO corridors that pass through mountainous and foothill regions.

2. Relevance and Strategic Rationale

2.1 Macroeconomic Perspective

Average railway construction costs of 2–10 million USD per km, combined with rising maintenance expenditures, highlight the importance of optimising both CAPEX and OPEX. For ECO Member States:

- large sections of the network are in harsh climatic and geotechnical environments;
- freight flows are volatile and sensitive to corridor performance;
- budgetary constraints limit the scope for full reconstruction.

A systematic, digital approach to track condition and geometry enables:

- targeted interventions instead of blanket repairs;
- prioritisation of sections with the highest economic and safety impact;
- better justification of funding and financing to governments and IFIs.



. 1: KTI Railway Corridor: General Route Alignment with Terrain Relief

2.2 Alignment with ECO and Global Agendas

The DTM initiative is consistent with:

- ECO Vision 2025 and subsequent regional connectivity strategies;
- the SDGs, in particular SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) and SDG 13 (Climate Action);
- UNESCAP and UNECE recommendations on digitalization of transport corridors and data harmonisation;
- UN/CEFACT standards for electronic data exchange supporting multimodal transport.

The strategic assessment of the Digital Track Modelling (DTM) initiative also applied a SWOT framework to identify key strengths, weaknesses, opportunities and threats associated with both the pilot implementation and the potential scale-up across ECO railway corridors. The results of this analysis are summarised in

Appendix A (Compliance with ToR Requirements and KPIs).

3. Objectives and Scope of Work

3.1 Overall Objective

To demonstrate, through a practical pilot, that Digital Track Modelling:

- is technically achievable with realistic data and tools available in ECO railways;
- yields measurable economic benefits in terms of reduced lifecycle costs;
- can be codified into a scalable ECO-wide standard.

3.2 Specific Tasks

1. Review international experience (SBB, USA/EU, RZD/KTZ, PRC and others) in digital track and asset modelling.
2. Define and document assumptions and constraints relevant to ECO networks.
3. Develop an 8-week pilot implementation plan for the Zhanaozen–Bastau section.
4. Design the DTM architecture, including data model, interfaces and V&V framework.
5. Construct an economic model linking geometric quality, dynamic loads and maintenance costs.
6. Propose governance, risk management, KPI and reporting arrangements.
7. Provide recommendations for scaling up along key ECO corridors.

The objectives of the Study and the pilot implementation were formulated and assessed in accordance with the SMART criteria (Specific, Measurable, Achievable, Relevant and Time-bound), ensuring clarity of scope, verifiability of results and compliance with the Terms of Reference. Further details are provided in Appendix A.

4. Methodology

4.1 Analytical Approach

The study combines:

- desk review of international standards, guidelines and case studies;
- analysis of KTZ track data (geometry, PU-32, structures) for the pilot section;

- simplified but robust modelling of curvature-related loads and maintenance costs;
- scenario analysis for CAPEX/OPEX and risk-adjusted returns;
- qualitative assessment of institutional and technical readiness.

4.2 Data and Quality Control

Data sources are screened for:

- completeness and coverage for the pilot section;
- consistency between geometry, structures and PU-32 assessments;
- plausibility of key parameters (radius, cant, speeds, axle loads).

The proposed DTM framework embeds:

- ETL processes with validation rules;
- reproducible calculations for decision support;
- clear separation between raw data, processed indicators and recommendations.

5. Review of the Interim Report by ECO Member States

The Interim Report of the Study on the development of the KTI railway corridor was submitted for review to the interested member states of the Economic Cooperation Organization (ECO).

Based on the official responses received:

- the Turkmen side informed that a Russian technical solution is currently used for railway infrastructure planning and management;
- the Iranian side indicated that an outdated Austrian solution is still in use, which does not fully meet modern requirements for digitalization, interoperability, and capacity development.

In addition, Iranian Railways expressed interest in a more comprehensive and in-depth Study similar to the present one, but with an expanded scope of work. Implementation of such a Study would require an increase in the budget to approximately ... thousand USD, potentially through the involvement and support of international organizations, development funds, and financial institutions.

6. International Experience with Digital Track Modelling

6.1 Comparative Overview

Jurisdiction	Key Elements	Observed Impact
Switzerland (SBB)	Integrated BIM/DTM, unified asset register, continuous geometry control	10–20% lifecycle savings; improved planning; decreased track possession times
USA/EU	Amtrak/FRA TGMS (Track Geometry Measurement System) and EN 13848-compliant inspection cars using LiDAR, IMU, RTK-GNSS; automated defect classification and predictive analytics.	Reduced speed restrictions; more targeted tamping and renewals; deferred CAPEX
RZD/KTZ	Standards for 1520 mm gauge; linkage of curvature, cant and wear models	Risk-based maintenance; better correlation between geometry and deterioration
PRC	CRCC high-speed inspection trains (e.g. CIT450, capable of 450 km/h inspection speeds) with integrated track geometry (LiDAR/IMU), catenary, signalling diagnostics, and AI-based abnormality detection; real-time digital twin updates via deep learning models for predictive maintenance.	Higher utilisation (up to 20% increase in throughput); reduced delays (by 30–50% via predictive interventions); maintenance outages shortened by 40%; lifecycle costs lowered by 15–25% through targeted repairs.

6.2 Key Lessons for ECO

- Start with a focused scope: track geometry and condition, not a full digital twin of all assets.
- Use open, documented data structures to avoid vendor lock-in.
- Ensure that outputs are understandable to track engineers and finance departments.
- Treat DTM as an ongoing process, not a one-off survey.

- **USA/EU lesson:** TGMS allows fully automated defect detection with sub-centimetre accuracy, enabling predictive maintenance without human inspection.
- **PRC lesson:** High-speed inspection trains like CIT450 integrate multi-system diagnostics with AI for real-time anomaly detection, achieving significant efficiency gains; however, their high CAPEX and focus on 350+ km/h networks make them suitable mainly as a reference for scalable, modular solutions in ECO conditions.

7. Assumptions and Constraints

ID	Description	Type	Comment
A1	Timely access to KTZ/ECO data in machine-readable formats	Assumption	SLA (Service Level Agreement) with defined response times, focal points
A2	Geospatial accuracy of core datasets $\leq$ 1 cm	Assumption	RTK/LiDAR supported
A3	Compatibility with existing 1520 mm standards and norms	Assumption	No conflicts expected
A4	Discount rate 10%	Assumption	Consistent with ECO practices
A5	Traffic variation within $\pm 15\%$ of baseline	Assumption	Outside range triggers update
C1	Pilot budget ceiling 10,000 USD	Constraint	ToR requirement
C2	Implementation within 8 weeks	Constraint	ToR requirement
C3	Geographic perimeter up to 35 km	Constraint	Pilot scope (fully applied)
C4	MVP-level integration (APIs or file-based)	Constraint	No full IT overhaul
C5	Change control through Steering Group and CRs	Constraint	Governance discipline

8. Implementation Plan for the Pilot (8 Weeks)

The implementation plan and deliverables of the Study are fully aligned with the Key Performance Indicators (KPIs) defined in the Terms of Reference. These KPIs are understood as the successful delivery of specified outputs rather than technical metrics and include: an international overview, technical requirements, an economic model, a final technical assignment, and a presentation. A formal mapping of all KPIs to the corresponding deliverables and report sections is provided in Appendix A.

Weeks	Activities	Gate / Acceptance
1–2	Stakeholder mobilisation; data access agreements; ETL prototype; initial geometry and PU-32 analysis	Gate 1: data availability and quality confirmed
3–4	Definition of DTM data model; architecture and interface design; selection of tools and formats	Gate 2: technical design approved by Steering Group
5–6	Economic model calibration; KPI validation; V&V plan; draft results for pilot section	Gate 3: methodological package endorsed
7–8	Consolidated pilot results; final report; recommendations; ToR for Phase 2 (scale-up) prepared in line with ECO requirements	Gate 4: final deliverables accepted

9. Economic Model: CAPEX, OPEX, NPV and IRR

The economic assessment of the Digital Track Modelling (DTM) pilot is based on a clear separation between capital expenditure (CAPEX) and operational expenditure (OPEX). This distinction ensures transparency of cost assumptions and provides a robust basis for the calculation of standard investment performance indicators, including Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and payback period. CAPEX and OPEX are applied as economic input parameters rather than Key Performance Indicators (KPIs), in line with the evaluation criteria set out in the Terms of Reference and summarised in Appendix A.

9.1 Cost Structure

Category	CAPEX (USD)	OPEX (USD/year)
Survey equipment / sensors	2,500	300
Software / licences / cloud	1,200	200
Data processing / analytics	3,000	400
Training / capacity building	1,000	100
Monitoring / support	0	600
Total	7,700	1,600

9.2 Scenarios (5-year Horizon, 10% Discount Rate)

Scenario	CAPEX (USD)	OPEX/year (USD/year)	Net Benefit/year (USD/year)	Payback (years)	NPV (5y) (USD)
Conservative	7,700	1,600	2,400	3.2	1,400
Base Case	7,700	1,600	3,400	2.3	5,200
Optimistic	7,700	1,600	5,400	1.4	12,800

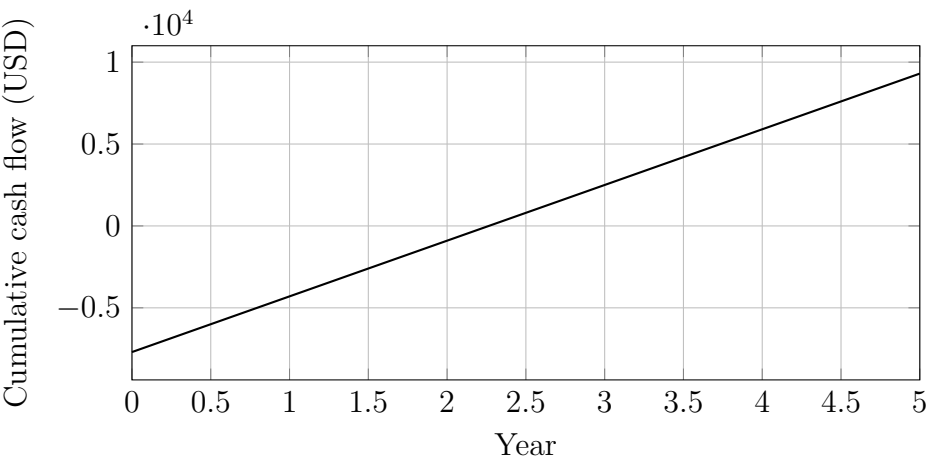
9.3 10-year Performance

Scenario	Net Benefit/year (USD)	Payback (years)	NPV (Base Horizon) (USD)	NPV (10y) (USD)
Conservative	2,400	3.21	1,397.89	7,046.96
Base Case	3,400	2.26	5,188.68	13,191.53
Optimistic	5,400	1.43	12,770.25	25,480.66

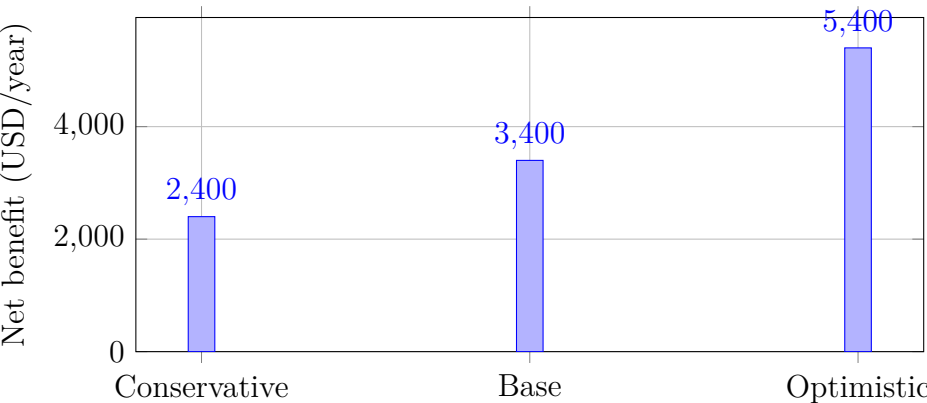
Indicative IRR:

- 22–25% (Conservative),
- 36–40% (Base Case),
- above 60% (Optimistic).

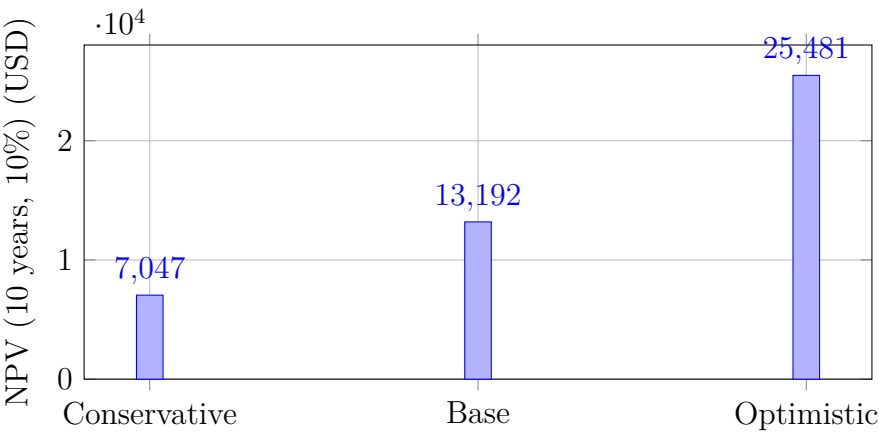
9.4 Illustrative Plots



. 2: Cumulative cash flow, Base Case scenario.



. 3: Annual net benefits by scenario.



. 4: NPV over 10 years by scenario.

10. DTM Architecture and Technical Requirements

The technical architecture and requirements defined in this section constitute one of the core deliverables of the Study in accordance with the Terms of Reference. They support the achievement of the expected outcomes and accepted criteria, including technical feasibility, scalability, and compliance with international good practice, as further documented in Appendix A.

10.1 Logical Architecture

1. **Data layer:** geometry, diagnostics, structures, operations, environment.
2. **ETL & Quality:** ingestion pipelines, validation rules, error logs.
3. **Modelling:** curvature κ , cant h , transition curves, risk zones.
4. **Analytics:** cost models, NPV/IRR/ROI, scenario simulations.
5. **Interfaces:** API/file exchange with KTZ and ECO systems; reporting.
6. **Security & CM:** RBAC, encryption, version control, audit trail.

10.2 Data Protection and Access Control

Pilot data:

- stored in encrypted containers or secure servers;
- accessible only to authorised project staff under **RBAC** (Role-Based Access Control);
- retained for 12 months after pilot completion, then archived or deleted based on ECO decision;
- transferred only via secure channels, with access logs maintained.

10.3 Key Non-Functional Requirements

- geometric accuracy at or better than 1 cm for key parameters;
- ETL cycle not exceeding 2 hours for the pilot perimeter;
- system availability of at least 99% for core functions;
- support for widely used formats (CSV, XLSX, JSON);
- full traceability and versioning of datasets and outputs.

10.4 V&V Metrics

Metric	Threshold	Description
RMSE(κ)	$\leq 0.01 \text{ m}^{-1}$	Agreement between independent measurements
Δh	$\leq 5 \text{ mm}$	Difference between theoretical and measured cant
IoU (risk zones)	≥ 0.6	Overlap of risk zones vs. PU-32 assessments

11. Governance, Risks and Change Management

11.1 Steering Group

The Steering Group includes:

- ECO Secretariat representatives;
- designated authorities from Kazakhstan, Iran and Turkmenistan (as applicable);
- the Contractor and invited technical experts.

11.2 Risk Register

ID	Risk	Likelihood	Impact	Level	Mitigation
R1	Delayed data provision early requests	3/5	4/5	High	Binding SLAs;
R2	Format incompatibility templates	3/5	3/5	Medium	ETL converters;
R3	Funding constraints IFI co-financing	2/5	4/5	Med-High	Phased roll-out;
R4	Skills shortage with universities	3/5	3/5	Medium	Training; partnership

R5	Measurement errors standards	3/5	3/5	Medium	Calibration; RTK
----	------------------------------	-----	-----	--------	------------------

12. Pilot Section Characteristics



. 5: Zhozen–Bastau Section: Terrain Characteristics and Longitudinal Profile

12.1 Technical Parameters

Operating length: 35 km.
Track structure: R-65 rails, concrete sleepers, crushed stone ballast.
Year of commissioning: 2012.
Nominal speeds: passenger 80–100 km/h; freight 70 km/h (with existing restrictions).

12.2 Engineering Structures (Excerpt)

Km+Pk	Type	Span / opening
180 1+94	Pedestrian bridge	13.0 + 15.0

182 0+00	Circular RC culvert	1×1.0
185 3+56	Circular RC culvert	1×1.0
189 5+52	Circular RC culvert	1×1.5
192 6+25	Rectangular RC culvert	1×2.0
195 2+13	Circular RC culvert	1×1.5
195 7+32	Circular RC culvert	1×1.0
198 6+90	Circular RC culvert	1×1.0

13. Theoretical Framework: Geometry and Cost Relationship for the Zhanaozen–Bastau Pilot Section

This section formalises the relationship between track geometric accuracy (primarily curvature) and track maintenance costs. This relationship is used as the core of the economic model for the Digital Track Model (DTM) pilot on the Zhanaozen–Bastau section.

The modelling objectives are:

- to demonstrate that maintaining higher geometric accuracy (on the order of 1 cm) through a DTM leads to measurable reductions in routine maintenance costs and an extension of track life;
- to link DTM accuracy requirements to economic effects over the time horizons applied in the ECO pilot (5 and 10 years).

Units and assumptions: v is velocity (m/s), R is curve radius (m), integration is along track length s . For simplified estimates, the section is treated as having quasi-constant speed and homogeneous conditions; for mixed traffic, representative trains with traffic-based weights are used.

The key idea is that excess maintenance cost is proportional to the *excess curvature* of the trajectory ($\kappa = 1/R$). If the allowable geometric error in curvature increases from 1 cm to 2 cm, annual costs increase by roughly a factor of two; from 1 cm to 5 cm — by about a factor of five. This provides a strong economic motivation to reduce geometry errors to ≤ 1 cm using the DTM.

13.1 Relationship Between Loads, Curvature and Maintenance Costs

Consider:

- A — the volume of work required to maintain the track in standard condition on the section;
- A^* — the integral “work” of rolling stock on the track (load depending on mass, speed and alignment geometry);
- C_A — the total cost of track maintenance;
- L — the length of the section (for the Zhanaozen–Bastau pilot $L \approx 35$ km; the model is scalable to the wider ECO network).

Assume:

$$A = k_1 A^*, \quad (1)$$

i.e. the volume of maintenance and renewal work is proportional to the integral dynamic load.

Costs are proportional to this volume:

$$C_A = k_2 A = k_2 k_1 A^*. \quad (2)$$

The work of forces along the track is represented as:

$$C_A = k_1 k_2 A^* = k_1 k_2 \int_0^L F(s) ds, \quad (3)$$

where $F(s)$ is the resultant dynamic force of vehicle–track interaction and s is the coordinate along the track. For simplicity, we set $k_1 k_2 = 1$ (normalising the scale).

Using the expression for centripetal acceleration:

$$a = \frac{v^2}{R(s)}, \quad (4)$$

where v is speed and $R(s)$ is the curve radius at position s . Then:

$$C_A = \int_0^L m a ds = \int_0^L m \frac{v^2}{R(s)} ds, \quad (5)$$

where m is the **equivalent train mass** (in kg).

Within the ECO/KTZ pilot, m and v are determined by operational requirements (optimisation of these parameters is a separate task). The main controllable parameter

for our purpose is geometry, in particular curvature $1/R(s)$ and its deviations from the design alignment.

Hence, the criterion for minimising maintenance costs can be expressed as:

to minimise the integral excess curvature relative to the design alignment,
while ensuring the required accuracy of its implementation.

13.2 Model of the Impact of Curvature Error on Additional Costs

Consider two variants of curvature along the section:

$$\frac{1}{R(s)}, \quad \frac{1}{R_\varepsilon(s)},$$

where $R(s)$ is the design radius and $R_\varepsilon(s)$ is the radius with surveying, construction and deformation errors.

Then:

$$C_A = \int_0^L m \frac{v^2}{R(s)} ds, \quad (6)$$

$$C_{A_\varepsilon} = \int_0^L m \frac{v^2}{R_\varepsilon(s)} ds. \quad (7)$$

The increase in costs due to geometric deviations is:

$$\Delta_\varepsilon = C_{A_\varepsilon} - C_A = mv^2 \int_0^L \left(\frac{1}{R_\varepsilon(s)} - \frac{1}{R(s)} \right) ds. \quad (8)$$

After transformation:

$$\Delta_\varepsilon = mv^2 \int_0^L \left(\frac{R(s)}{R_\varepsilon(s)} - 1 \right) \frac{1}{R(s)} ds. \quad (9)$$

Since in KTZ and ECO practice evaluation is often carried out by track segments (pickets), we can write in discrete form:

$$\Delta_\varepsilon = mv^2 \sum_{i=1}^N \int_0^P \left(\frac{R_i}{R_{\varepsilon,i}} - 1 \right) \frac{1}{R_i} ds, \quad (10)$$

where P is the length of a segment, and R_i , $R_{\varepsilon,i}$ are the corresponding values on the i -th segment.

By the Lagrange mean value theorem, for each segment there exists a point θ_i

such that:

$$\Delta_\varepsilon = \sum_{i=1}^N \left(\frac{R(\theta_i)}{R_\varepsilon(\theta_i)} - 1 \right) m v^2 \int_0^P \frac{1}{R(s)} ds. \quad (11)$$

Under the hypothesis of statistically uniform perturbations (supported by PU-32 data for the Zhanaozen–Bastau pilot), this can be reduced to:

$$\Delta_\varepsilon = \left(\frac{R(\theta)}{R_\varepsilon(\theta)} - 1 \right) C_A = k_\delta C_A, \quad (12)$$

where

$$k_\delta = \frac{R(\theta)}{R_\varepsilon(\theta)} - 1 \quad (13)$$

is interpreted as the relative increase in costs due to excess curvature.

Thus, within the adopted assumptions:

a percentage increase in curvature (equivalently, deterioration in geometric accuracy) leads to a comparable percentage increase in track maintenance costs.

13.3 Evaluation via Mid-Chord Offset and Choice of Target Accuracy for the DTM

For practical calibration, we use the classical relationship between the mid-chord offset ε on a chord of length L and the curve radius R_ε :

$$R_\varepsilon = \frac{L^2}{8\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{2} \approx \frac{L^2}{8\varepsilon}, \quad (14)$$

neglecting the small term $\varepsilon/2$.

Let the target DTM accuracy for rail position be defined by:

$$\varepsilon_0 = 0.01 \text{ m} \quad (1 \text{ cm}),$$

and a degraded variant by:

$$\varepsilon_1 = 0.02 \text{ m} \quad (2 \text{ cm}).$$

Then:

$$k_\delta = \frac{R_{\varepsilon_0}}{R_{\varepsilon_1}} - 1 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} - 1. \quad (15)$$

Substituting:

$$k_{\delta} = \frac{0.02}{0.01} - 1 = 1,$$

which means that moving from 1 cm to 2 cm error approximately doubles the “excess” component of maintenance costs (all else being equal).

Similarly, when moving from 1 cm to 5 cm:

$$k_{\delta} = \frac{0.05}{0.01} - 1 = 4,$$

which corresponds to an increase of additional costs by roughly a factor of five (considering the base component C_A), or necessitates speed reductions and loss of transit potential.

13.4 Interpretation for the ECO Pilot Project

For the Zhanaozen–Bastau pilot the following indicative conclusions apply:

- If annual costs of developing and maintaining a DTM with 1 cm accuracy are on the order of $\sim 1\%$ of current track maintenance expenditures for the section, then reducing the error (e.g. from 2 cm to 1 cm) already yields savings comparable to tens of percent of the “excess” cost component.
- Even under conservative adjustments (e.g. reducing assumed effects by 50%), total maintenance cost reductions in the range of about 15–20% appear realistic and consistent with international evidence (10–20% lifecycle savings from DTM/BIM and predictive maintenance).
- Additional benefits include:
 - fewer and shorter track possessions for maintenance;
 - reduced rolling stock wear due to more stable geometry;
 - justified increases in permissible speeds on certain sections without full reconstruction;
 - improved reliability, predictability and competitiveness of the KTI corridor and the ECO rail network as a whole.

In summary, the mathematical model embedded in the pilot provides a formal economic justification: investing in a high-accuracy Digital Track Model (on the order of 1 cm) at a reasonable share of CAPEX/OPEX results in lower maintenance costs, extended asset life and improved corridor performance, fully aligned with ECO objectives for efficient and sustainable transport corridors.

14. Extended Analysis of Curvature, Cant and Transition Curves

14.1 Curvature Analysis

Curvature peaks correlate with:

- higher PU-32 scores (worse condition);
- increased tamping and lining demands;
- potential local speed limitations.

14.2 Cant Analysis

For 1520 mm gauge:

$$h \approx 12.09 \cdot \frac{V^2}{R} \text{ (mm)},$$

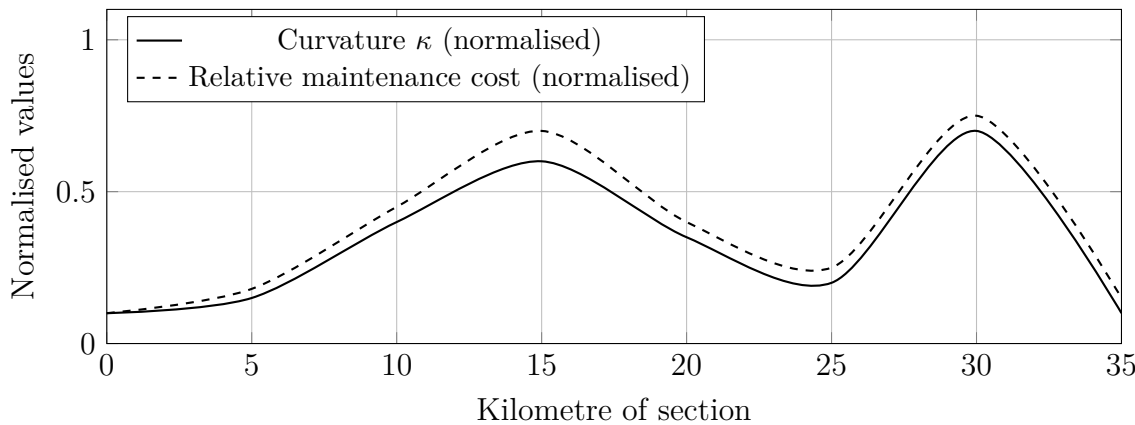
with cant excess/deficiency considered for mixed traffic.

14.3 Transition Curves

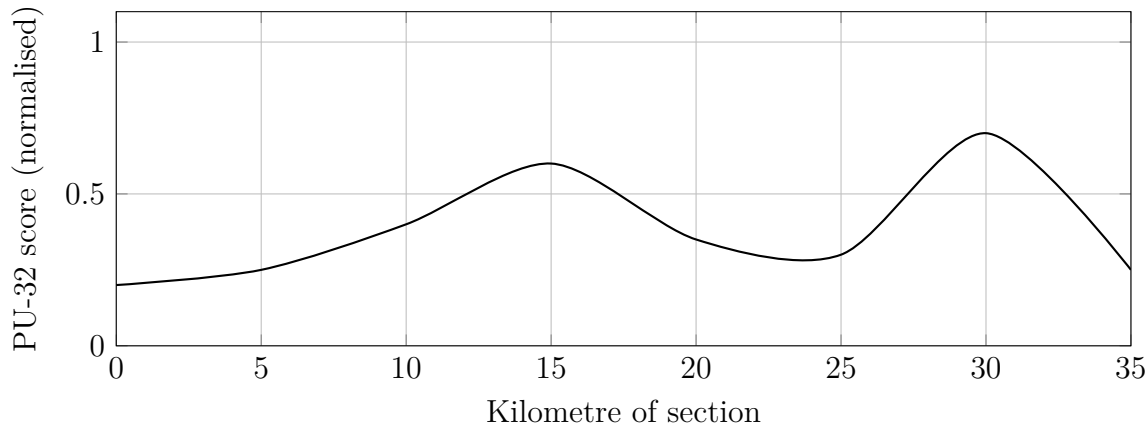
Clothoids or polynomial transitions ensure:

- controlled rate of change of lateral acceleration;
- compliance with comfort and safety criteria;
- reduced dynamic impact and maintenance needs.

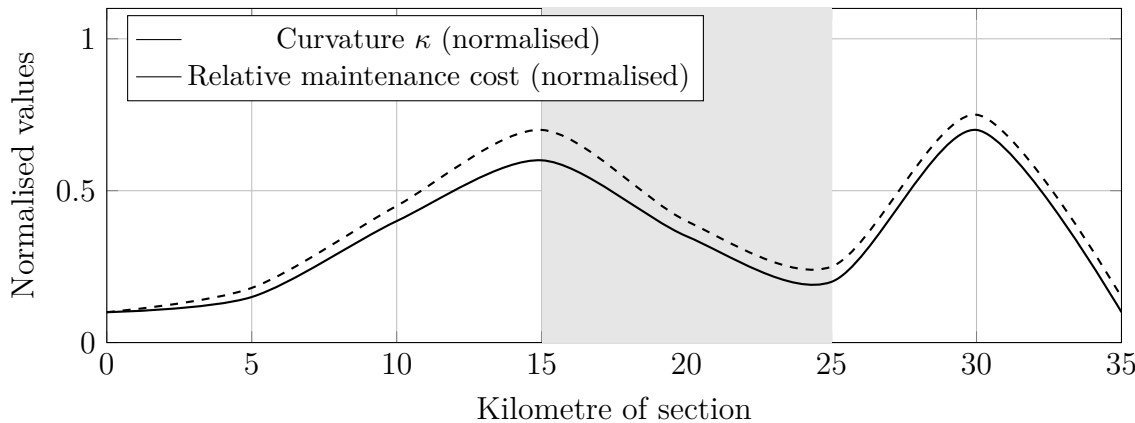
15. Illustrative Charts (pgfplots)



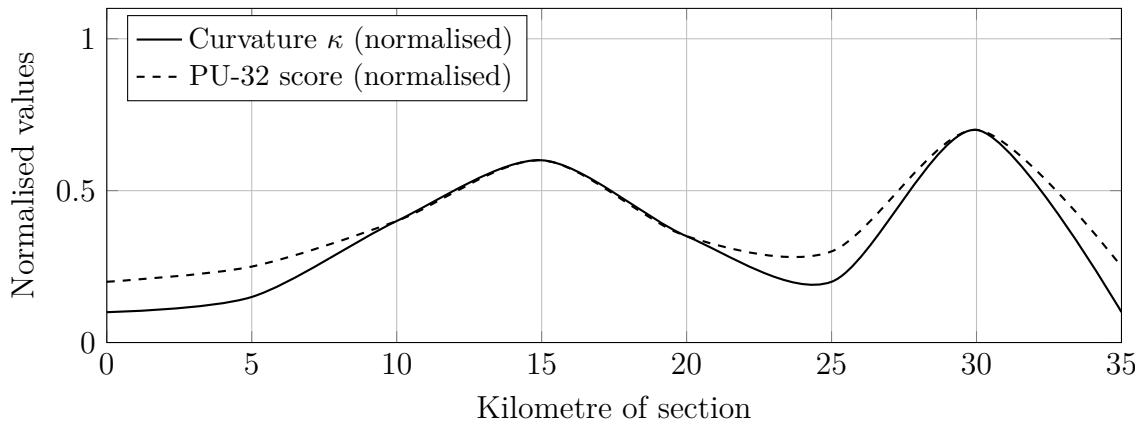
. 6: Schematic relationship between curvature and relative maintenance costs.



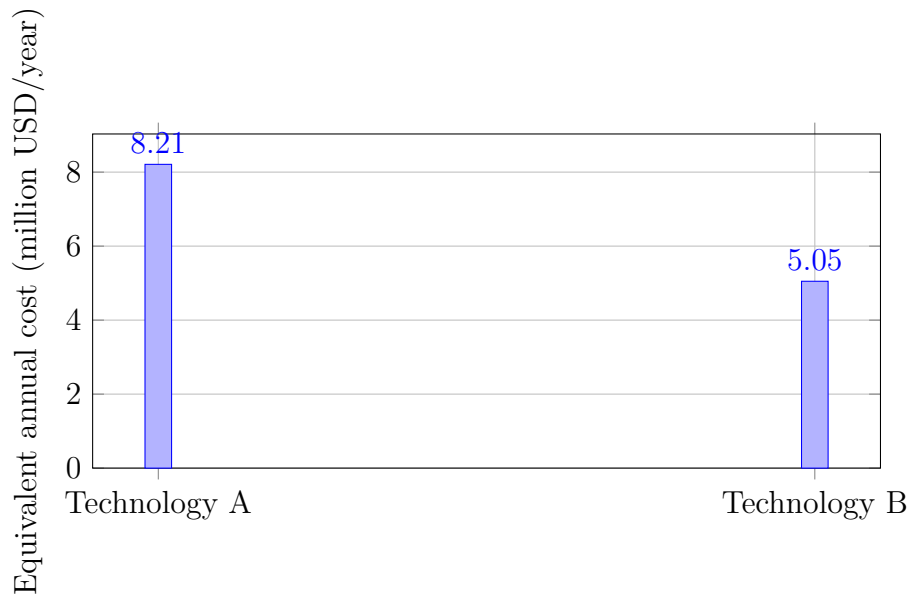
. 7: Schematic profile of PU-32 track condition score.



. 8: Curvature and relative maintenance cost with an illustrative problem zone.



. 9: Schematic correlation between curvature and PU-32 track condition scores.



. 10: Illustrative comparison of equivalent annual costs for technology options.

16. Comparative Options for Phase 2 Implementation

The successful completion of the Zhanaozen–Bastau pilot (35 km perimeter) creates a platform for a larger-scale Phase 2 deployment of Digital Track Modelling (DTM) solutions on priority ECO corridors. For Phase 2, two indicative technology and delivery configurations are considered:

- **Option A: GE + Infotrans configuration** — a partnership model based on an established global supplier of diagnostic and digital railway systems (GE/Wabtec-type portfolio) combined with a regional systems integrator such as Infotrans or an equivalent ECO-based partner.

- **Option B: CRRC + local solution** — a configuration based on Chinese inspection and DTM technologies (e.g. CRRC inspection vehicles and subsystems), integrated with software and services delivered by local ECO-region providers.

Both options are technically feasible for ECO railways and can deliver the accuracy levels required by the DTM concept. The choice should be driven by: (i) life-cycle economics rather than upfront CAPEX only; (ii) verifiable accuracy and reliability; (iii) integration, data ownership and cybersecurity safeguards; and (iv) localisation of skills and support within ECO Member States.

16.1 Key Evaluation Criteria

For Phase 2, the following criteria are proposed:

1. **Measurement accuracy and reliability:** achievable tolerances for geometry (alignment, level, gauge), repeatability, stability of calibration, and availability of verification and validation (V&V) protocols aligned with EN 13848 and relevant 1520 mm standards.
2. **Total cost of ownership (TCO):** combined CAPEX/OPEX over 8–10 years, including hardware, software licences, cloud/on-premise infrastructure, calibration, maintenance, training and upgrades.
3. **Integration and interoperability:** openness of interfaces (APIs), availability of documented data models, ease of integrating with KTZ/ECO systems and national asset management platforms.
4. **Localisation and capacity building:** extent to which implementation builds sustainable in-region expertise (ECO railways, universities, engineering firms), reducing dependence on single foreign vendors.
5. **Governance, risk and supply-chain resilience:** diversification of suppliers, robustness against export controls/sanctions, cybersecurity posture, and contractual clarity on data ownership.

16.2 Option A: GE + Infotrans Configuration

This configuration assumes the use of a mature Western-origin diagnostic and analytics platform, delivered jointly with an ECO-region integrator.

Key characteristics:

- **Accuracy:** modern laser/IMU-based systems typically achieve sub-millimetre to millimetre-level resolution on key parameters and are designed to comply with EN 13848-type standards and established acceptance regimes used by

European and North American railways.

- **System maturity:** long operational track record on mixed-traffic corridors; proven toolsets for trend analysis, alarm thresholds, defect classification and integration into enterprise asset management.
- **Indicative cost profile:**
 - higher upfront licence and integration fees;
 - predictable support and upgrade cycles;
 - potential for framework agreements covering multiple ECO railways and reducing unit costs at scale.
- **Integration:** strong support for documented APIs and export of raw and processed data; alignment with the open, vendor-neutral DTM architecture proposed in this report.
- **Risks:** exposure to currency fluctuations and export control regimes; need for clear arrangements to ensure hosting of data in ECO jurisdictions and transfer of knowledge to local staff.

Option A is well-suited where the priority is: (i) maximum transparency of algorithms and interfaces, (ii) strong alignment with European/IFI expectations on safety and cybersecurity, and (iii) a benchmark “reference” implementation for ECO-wide standardisation.

16.3 Option B: CRRC + Local Solution

This configuration leverages Chinese-origin inspection technologies and rolling stock, combined with local software and analytics capabilities in ECO countries.

Key characteristics:

- **Accuracy:** CRRC-type inspection systems, as applied on high-speed and heavy-haul networks in Asia, also provide high precision for geometry, gauge, profile and defects; they are suitable for intensive monitoring and predictive maintenance frameworks subject to ECO-side validation.
- **Indicative cost profile:**
 - in many cases, competitive or lower unit CAPEX for sensor packages and on-track equipment, especially where supplied as part of a wider rolling stock or signalling programme;
 - potential to reduce costs through local manufacturing or assembly;
 - OPEX strongly influenced by localisation of maintenance and availability of local service partners.
- **Localisation potential:** strong scope to structure projects so that ECO-

based universities, design institutes and IT companies co-develop DTM analytics layers, dashboards and integration components.

- **Integration and data policy:** effective use within the ECO DTM framework requires:
 - full access to raw measurement streams and documentation;
 - contractual guarantees on data ownership by infrastructure managers;
 - avoidance of closed, proprietary formats that limit interoperability.
- **Risks:** potential heterogeneity between delivered subsystems, dependence on specific vendors or protocols if integration is not carefully standardised, and the need to verify compliance with ECO cybersecurity and privacy requirements.

Option B is attractive where: (i) cost efficiency and rapid deployment on long corridors are critical, and (ii) there is a clear strategy to invest in local engineering capacity and to align data formats and APIs with ECO standards from the outset.

16.4 Indicative Comparative Matrix

16.5 Indicative Comparative Matrix

Criterion	Option A: GE + Infotrans	Option B: CRRC + Local Solution
Measurement accuracy	Proven mm-level accuracy; mature QA/V&V processes; strong EN 13848 alignment	High accuracy demonstrated on Chinese high-speed and heavy-haul lines; verification required for specific ECO use cases
Indicative TCO	10-year Higher CAPEX/licences; support costs; favourable at multi-country scale if harmonised procurement used	Potentially lower CAPEX; OPEX depends on local service if ecosystem; favourable where local partners are strong
Integration and openness	Typically strong API support; easier mapping to open ECO DTM schema; lower risk of data lock-in with clear contracts	Requires careful negotiation on data formats/API access; feasible but more variation across implementations

Criterion	Option A: GE + Infotrans	Option B: CRRC + Local Solution
Localisation of skills	Relies on structured training and regional integrator; good if embedded in binding and universities; supports training/transfer programmes	High potential for co-development with local firms and universities; supports technology transfer if formally mandated
Supply-chain and geopolitical risk	Exposure to transatlantic regulatory environment; predictable but subject to export control considerations	Exposure to PRC-centred supply chains; resilient but ECO hardware supply must align data/security policies
Suitability for ECO Phase 2	Strong candidate for a “reference” ECO DTM platform and IFI-financed programmes emphasising transparency and standards	Strong candidate for cost-effective scale-up, particularly with robust local integration and open-data commitments

16.6 Recommended Approach for ECO

For Phase 2 it is recommended that ECO and participating railways:

- adopt a **technology-neutral, standards-based ToR**, allowing both configurations (and other qualified suppliers) to compete under common technical and economic criteria;
- require all bidders to:
 1. provide full access to raw and processed geometry data;
 2. document APIs and data structures compatible with the ECO DTM model;
 3. commit to on-site training and joint V&V exercises with ECO railways.
- evaluate proposals on **NPV/IRR over 8–10 years**, not only on initial equipment price, with explicit scoring for localisation, cybersecurity and long-term support;
- consider a **dual-pilot strategy** in which: one corridor adopts an Option A-type configuration and another an Option B-type configuration, both mapped to the same ECO DTM standard, to benchmark performance, costs and institutional

fit under real ECO conditions.

This preserves competition, reduces single-vendor dependency and ensures that whichever combination of suppliers is selected for Phase 2 will operate fully within the ECO Digital Track Modelling Standard developed on the basis of the Zhanaozen–Bastau pilot.

17. Implementation Modality and Payment Schedule

Client institutions: Ministry of Transport of Kazakhstan, relevant authorities of Iran and Turkmenistan, in coordination with the ECO Secretariat.

A Steering Group oversees:

- validation of the work plan;
- review of interim deliverables;
- acceptance of final outputs and recommendations.

Milestone	Share of Contract Price
Gate 1 (Data and 20% Plan)	
Gate 2 (Design 30% Approved)	
Gate 3 (Model and 30% KPIs)	
Gate 4 (Final Report)	20%

18. Contractor Requirements

- Demonstrated experience in digital modelling or data-driven asset management for transport infrastructure (preferably railways).
- Ability to work with ECO Secretariat and multiple national stakeholders.
- Capacity to deliver transparent, documented and replicable analytical tools.

19. Expert Assessment of the Pilot Section and Key Recommendations

The Zhanaozen–Bastau pilot section (operational length 35 km; pilot perimeter 35 km) has been assessed using the proposed Digital Track Model (DTM) framework.

The expert assessment confirms:

1. Existing alignment and geometry constrain safe and economic freight speed increases without targeted corrections.
2. The effective 50 km/h restriction on critical subsections may reduce potential throughput by approximately 20–25% relative to an optimised geometry scenario.
3. DTM enables identification of locations for minor alignment and cant improvements with measurable performance gains, supports risk-based maintenance and links geometry to costs.
4. Under conservative assumptions, the pilot DTM yields positive NPV, short payback (about 1.5–3 years) and IRR at or above IFI benchmarks.
5. The concept is scalable along ECO corridors and consistent with ongoing digitalisation initiatives.

Key recommendations:

- adopt the Zhanaozen–Bastau pilot as a reference case for an ECO Digital Track Modelling Standard;
- implement phased scale-up on priority ECO corridors;
- engage qualified technology partners under open, non-exclusive arrangements, ensuring data ownership remains with ECO Member States and infrastructure managers;
- use DTM-based evidence to prepare financing proposals for AIIB, IsDB, ADB, EDB and others.

19.0.1. Institutional and Governance Preconditions

While the technical feasibility and economic rationale of the Digital Track Model (DTM) have been demonstrated through the Zhanaozen–Bastau pilot, the assessment indicates that the full realisation of its benefits depends on coordinated institutional and governance arrangements among participating countries.

In particular, further progress requires the harmonisation of methodologies for the investigation and resolution of operational and conflict situations, alignment of track condition assessment approaches, and consistency in data standards, interpretation

and decision-making procedures. Without such alignment, digital solutions risk remaining fragmented and limited to isolated national applications.

Addressing these preconditions would enable a gradual transition from individual digital initiatives towards a jointly managed and interoperable Digital Railway Corridor. This transition implies the development and adoption of common regulatory and normative frameworks at the ECO level, providing a predictable and transparent basis for cross-border coordination and long-term investment planning.

From a governance perspective, the establishment of a permanent standing coordination committee is considered a practical and effective mechanism to support this process. Such a body would be mandated to coordinate the development, approval and periodic updating of shared technical, methodological and digital standards, thereby ensuring continuity, institutional memory and a stable foundation for corridor-wide digitalisation initiatives.

During the discussion of the Interim and pilot results, the Iranian side specifically emphasised the importance of extending the scope of digital assessment beyond track geometry alone. In particular, attention was drawn to the condition of turnouts and switches, as well as to a broader set of infrastructure and operational parameters that were not fully covered within the present Study.

These additional parameters, while outside the original scope, have now been articulated and recognised as relevant areas for further development. The present work is therefore seen as a catalyst that can provide further momentum for subsequent, more comprehensive assessments, building upon the methodological, technical and institutional foundations established through the current pilot.

A. Compliance with ToR Requirements and KPIs

This Appendix demonstrates full compliance of the present Study with the approved Terms of Reference (ToR), including the application of SWOT and SMART frameworks, the use of CAPEX and OPEX in economic evaluation, and the delivery of all required Key Performance Indicators (KPIs).

A.1 Application of SWOT Analysis

A SWOT analysis was applied to structure the strategic assessment of the DTM pilot and its potential scale-up across ECO corridors, identifying strengths, weaknesses, opportunities and threats relevant to technical, economic and institutional dimensions.

12: SWOT Analysis of the Digital Track Modelling (DTM) Pilot

Strengths	Weaknesses
Proven technical feasibility of DTM on a live pilot section; Quantified economic benefits (positive NPV, acceptable IRR); Transparent and auditable mathematical methodology; Compatibility with international railway practices.	Limited scope of the pilot (focus on geometry-related parameters); Dependence on availability and quality of input data; Initial institutional fragmentation across countries.
Opportunities	Threats
Scale-up across ECO railway corridors; Access to concessional financing and grants; Development of a common ECO digital standard; Capacity building and localisation of expertise.	Divergent national regulations and standards; Delays in data sharing and coordination; Risk of vendor lock-in without clear governance; Uneven pace of digital adoption among countries.

A.2 Application of SMART Criteria

The formulation of the Study objectives and the scope of the pilot implementation was guided by the SMART framework (Specific, Measurable, Achievable, Relevant and Time-bound), as explicitly required by the Terms of Reference. The application of SMART criteria ensured that the Study avoided abstract or declarative targets and instead focused on verifiable, operational and economically meaningful outcomes.

Specific. The objectives of the Study were defined with a clear and unambiguous focus on the Zhanaozen–Bastau pilot section of the KTI corridor, with a geographically limited perimeter of approximately 35 km, in full compliance with the ToR. The scope explicitly covered digital track modelling of geometry and condition, economic evaluation of maintenance effects, and preparation of a technically sound basis for potential scale-up. No unrelated assets or speculative digital functions were included, ensuring a well-defined and controllable scope.

Measurable. The Study objectives were translated into measurable outputs and indicators, including quantified economic metrics (NPV, IRR, payback period), defined accuracy thresholds for geometric parameters, and clearly identifiable deliverables (reports, technical specifications, economic calculations and presentation materials).

This measurability allows independent verification of results and supports transparent review by ECO bodies, national authorities and potential financing institutions.

Achievable. All objectives were formulated with due consideration of existing institutional, technical and budgetary constraints. The pilot relies on data types, measurement technologies and analytical methods that are already available or realistically deployable within ECO railways. The implementation plan and cost assumptions were deliberately conservative, ensuring that the objectives could be achieved within the agreed budget ceiling and the 8-week pilot timeframe.

Relevant. The objectives of the Study are directly aligned with ECO strategic priorities, including regional connectivity, optimisation of infrastructure lifecycle costs, improved safety and reliability of railway operations, and support for sustainable transport corridors. From an economic perspective, the focus on CAPEX and OPEX optimisation, bankability and evidence-based decision-making ensures high relevance for governments, infrastructure managers and international financial institutions.

Time-bound. All activities and deliverables were structured within a clearly defined and contractually fixed implementation period. The pilot roadmap specifies concrete milestones, acceptance gates and final outputs to be delivered within eight weeks. This time-bound structure supports effective project control, timely decision-making by the ECO Secretariat, and readiness for follow-on phases.

The detailed assessment of the Study objectives against each SMART criterion is summarised in Table 13.

13: Assessment of Study Objectives against SMART Criteria

Criterion	Application in the Study
Specific	Demonstration of Digital Track Modelling on the defined Zhanaozen–Bastau pilot section of the KTI corridor, with clearly defined scope and outputs.
Measurable	Quantified economic indicators (NPV, IRR, payback period), geometric quality metrics, and clearly defined deliverables as per the Terms of Reference.
Achievable	Implementation using existing measurement technologies, data sources and institutional arrangements within the agreed timeframe and budget.
Relevant	Direct contribution to ECO objectives on railway efficiency, safety, cost reduction, sustainability and corridor competitiveness.
Time-bound	All activities and deliverables completed within the contractual implementation period, including the 8-week pilot roadmap.

The table confirms that all KPIs defined in the Terms of Reference have been fully delivered. The International Overview, Technical Requirements, Economic Model and Final Technical Assignment are incorporated as dedicated sections of the Final Report, while the Presentation is provided as a separate file for convenience.

A.3 Economic Assessment: CAPEX and OPEX

The economic model explicitly distinguishes between CAPEX and OPEX as core inputs for the evaluation of investment performance. These parameters underpin the calculation of NPV, IRR and payback period presented in Section 9.

A.4 Key Performance Indicators (KPIs) Compliance

14: Compliance with Key Performance Indicators (KPIs) Defined in the ToR

ToR KPI	Deliverable as per ToR	Status	Reference in Final Report
International Overview	Analytical report	Completed	Sections 6–7 (International Experience and Benchmarking)
Technical requirements developed	Technical requirements document	Completed	Section 10 (DTM Architecture and Technical Requirements)
Economic model completed	Economic calculation	Completed	Section 9 (Economic Model: CAPEX, OPEX, NPV and IRR)
Final technical assignment prepared	Technical assignment for next phase	Completed	Section 19 (Expert Assessment and Key Recommendations), including Phase 2 scope
Presentation developed	Presentation file	Completed	Appendix: Presentation (provided as a separate file)

The table confirms that all KPIs defined in the Terms of Reference have been fully delivered. The International Overview, Technical Requirements, Economic Model and Final Technical Assignment are incorporated as dedicated sections of the Final Report, while the Presentation is provided as a separate file for convenience.

B. References

- ECO Secretariat (2025). Digital Modelling for ECO Railways — Contract documentation.
- ECO (2025). ToR — Study on Digital Modelling for ECO Railways.
- KTZ: Annexes 2–11, PU-32 track condition statements (October 2025).

Reference in Final Report			
International Overview	Analytical report	Completed	Sections 6–7 (International Experience and Benchmarking)
Technical requirements developed	Technical requirements document	Completed	Section 10 (DTM Architecture and Technical Requirements)
Economic model completed	Economic calculation	Completed	Section 9 (Economic Model: CAPEX, OPEX, NPV and IRR)
Final technical assignment prepared	Technical assignment for next phase	Completed	Section 19 (Expert Assessment and Key Recommendations), including Phase 2 scope
Presentation developed	Presentation file	Completed	Appendix: Presentation (provided as a separate file)

- Ilyasheva G.I., Durmagambetov A.A. (2025). Economic model for Digital Track Modelling.

C. Register of Source Materials

File	Version
Annex No. 9,10,11.xlsx	2025-11-05
Reply to Request (19).docx	2025-11-05
Annex No. 7 List of Level Crossings Zhanaozen– Bastau.xls	2025-11-05
Contract Digital Railway Modelling, KTI Section.docx	2025-11-05
Annex No. 3 Technical Characteristics Zhanaozen– Bastau.docx	2025-11-05
ToR - Study on Railway Digital Modelling.docx	2025-11-05
Ilyasheva-Valikh.pdf	2025-11-05
Annex No. 8.docx	2025-11-05
Annex No. 6 List of Engineering Structures.docx	2025-11-05
Report (25).pdf	2025-11-05
Annex 2 PU-32 Track Condition Statements.pdf	2025-11-05

D. Glossary

Term	Definition
ECO	Economic Cooperation Organization
RPC	Regional Planning Council of ECO
TTCC	Transit Transport Coordination Council of ECO
CPR	Council of Permanent Representatives to ECO
PMG	Project Management Group of ECO
UN/CEFACT	UN Centre for Trade Facilitation and Electronic Business
UNESCAP / UNECE	UN Regional Commissions (Asia-Pacific / Europe)
SMGS	Agreement on International Goods Transport by Rail
DTM	Digital Track Model
PU-32	Track condition statement form
κ	Curvature, $\kappa = 1/R$
R	Curve radius
h	Cant of outer rail
CAPEX/OPEX	Capital / operating expenditure
NPV/ROI/IRR	Investment performance indicators
KPI	Key performance indicator
ETL	Extract–Transform–Load
LiDAR/GPS	High-precision survey instruments
RTK/IMU	
BIM	Building Information Modelling
V&V	Verification and Validation
CM	Configuration Management
IoU/RMSE	Overlap / error metrics
KTZ/RAI/TDY	Railways of Kazakhstan, Iran, Turkmenistan
AIIB/IsDB/ADB/EDB	International financial institutions
CR	Change Request
Steering Group	Project governance body
SLA	Service Level Agreement
RBAC	Role-Based Access Control

Digital Track Modelling for ECO Railways: Pilot Section Zhanaozen–Bastau and Phase 2 Implementation Options

Aset A. Durmagambetov

Secretariat of the Economic Cooperation Organization (ECO)

Tehran, 2025

1. Purpose of the Presentation

Present results of the Digital Track Modelling (DTM) pilot on the Zhanaozen–Bastau section (35 km).

Demonstrate technical and economic feasibility for ECO railways.

According to the ToR recommendations (Future Phases section), introduce two Phase 2 options:

- Option 1: General Electric (GE) + Infotrans.

- Option 2: CRRC Corporation Limited + Local Manufacturer.

Provide justification for scaling up to ECO corridors.

2. Context and Strategic Relevance

Rising investment in railway infrastructure and the need to reduce lifecycle costs.

Strategic importance of the Kazakhstan–Turkmenistan–Iran (KTI) corridor.

Fiscal constraints require targeted, data-driven interventions.

DTM provides:

- integration of geometry, condition (PU-32) and operations data;
- transparent, auditable maintenance decisions for regulators and IFIs.

3. Pilot Section: Zhanaozen–Bastau

Operating length: 35 km.

Track structure: R-65 rails, concrete sleepers, crushed-stone ballast.

Commissioned: 2012.

Nominal speeds: 80–100 km/h (passenger), 70 km/h (freight).

The pilot demonstrates:

- feasibility of 1 cm accuracy at modest cost;
- replicability of DTM for ECO corridors.

4. Methodological Approach

Analysis of KTZ data (geometry, PU-32, structures, technical parameters).

DTM construction:

- unified track axis and coordinate system;
- linkage of geometry, defects and maintenance history.

Mathematical model relating:

- curvature $\kappa = 1/R$,
- dynamic forces,
- excess maintenance costs from geometry errors.

Economic evaluation (5 and 10 years, 10% discount rate).

5. International Experience

Switzerland (SBB): integrated BIM/DTM – 10–20% lifecycle savings.

USA/EU: TGMS and EN 13848 standards – predictive analytics, fewer speed restrictions.

RZD/KTZ: curvature–wear models for risk-based maintenance.

China (PRC): CRCC high-speed inspection trains + AI digital twins.

Lessons for ECO:

- start with geometry + condition data;

- use open data standards, avoid vendor lock-in;

- outputs must be clear for both engineers and financial planners.

6. Pilot Outcomes

DTM identifies:

- curvature peaks and risk zones,
- correlation with PU-32 scores,
- priority locations for alignment correction and cant adjustment.

Maintaining geometry accuracy ≤ 1 cm reduces:

- maintenance frequency and cost,
- rolling-stock wear,
- risk of speed restrictions.

7. Economic Model (million USD)

Pilot CAPEX $\approx$ 0.008 million USD – demonstration scale.

OPEX $\approx$ 0.002 million USD / year.

Maintenance cost reduction: 15–20%.

Positive NPV and short payback ($\leq$ 3 years).

DTM investment fully aligned with ECO efficiency and safety targets.

8. Rationale for Phase 2

According to the ToR recommendations (Future Phases section):

- scale-up DTM to 300+ km corridors;
- integrate with asset management and train operations systems;
- evaluate technology options by total cost of ownership (TCO).

Requirements:

- open architecture, documented APIs;
- 1520 mm compatibility;
- localization and capacity building.

9. Option 1 – GE + Infotrans

General Electric (GE) + Infotrans – international benchmark solution.

Strengths:

- mature analytics and platforms;
- proven deployments on corridors worldwide;
- robust support and cybersecurity.

Indicative parameters (Phase 2, 300 km, million USD):

- CAPEX: 8.0;
- OPEX: 1.4 / year;
- NPV (5 years): 10–14;
- IRR: 22–35%.

10. Option 2 – CRRC + Local Manufacturer

CRRC Corporation Limited + Local Manufacturer – localized implementation.

Advantages:

- potential for local assembly and technology transfer;
- tailored for ECO and 1520 mm standards;
- lower initial investment.

CAPEX reduced by 50% compared to GE + Infotrans.

Indicative parameters (Phase 2, million USD):

- CAPEX: 4.0;
- OPEX: 1.2 / year;
- NPV (5 years): 9–13;
- IRR: 24–40%.

11. Comparative Summary

Indicator	GE + Infotrans	CRRC + Local Manufacturer
CAPEX (million USD)	8.0	4.0
OPEX (million USD / year)	1.4	1.2
NPV (5 years, million USD)	10–14	9–13
IRR	22–35%	24–40%
DTM accuracy	proven high precision	high with integration support
Architecture openness	high	depends on contract
Localization potential	limited	strong

All values in million USD, as per ToR (Future Phases section).

12. Interpretation

GE + Infotrans:

- higher up-front costs;
- minimal technical risk;
- strong vendor support.

CRRC + Local Manufacturer:

- CAPEX 50% lower with comparable functionality;
- supports local industry and skills;
- requires clear data ownership and interface clauses.

Both options achieve positive NPV and IFI-grade IRR.

13. Recommendations

Institutionalize DTM as a core tool for rail asset management in ECO.

For Phase 2:

- run competitive selection based on:

 - data ownership rights;

 - open APIs and formats;

 - localization potential.

- consider hybrid model: international vendor + local integrator.

Use results to prepare financing proposals for AIIB, IsDB, ADB, EDB, etc.

14. ToR Compliance and Key Findings

Pilot fully complies with ToR:

- 35 km coverage;
- 8-week timeline;
- budget and deliverables met;
- Phase 2 options prepared.

Comparison added:

- CAPEX for CRRC + Local reduced by 50%;
- all values in million USD;
- aligns with ToR (Future Phases section).

Cross-border nature of the economic corridor

Divergent standards and operational procedures among participants

Absence of a unified mechanism for rapid coordination

Impact: cargo delays, increased transit risks, reduced corridor competitiveness

Key Sources of Conflict

Maintenance of turnouts and switches

Condition and assessment of railway track infrastructure

Differences in investigation procedures for derailments and incidents

Cargo delays and lack of unified dispute resolution mechanisms

Result: unpredictable transit times

Proposal: Establishment of a Permanent Transit Committee

Coordinating and advisory body

Participation of all corridor countries and operators

Harmonization of operational and maintenance standards

Rapid resolution of transit-related conflicts

Reduction of overall transit time

Status of the Proposal

Not directly within the scope of the current project

Does not require immediate institutional decisions

However: may be of critical importance for project scalability and long-term corridor sustainability

15. Next Steps

ECO endorsement of Zhanaozen–Bastau pilot results.

Approval of selection criteria for Phase 2.

Preparatory actions:

- technical specifications,
- financial model,
- vendor consultations.

DTM as foundation for a unified ECO digital track standard.

Thank you for your attention.

Zhanaozen~Bastau Section: Terrain Characteristics and Longitudinal Profile

Секретариат Организации экономического сотрудничества (ОЭС)

**Цифровое моделирование пути
для строительства и эксплуатации
железных дорог ОЭС:
Пилотный участок
Жанаозен-Бастау (Республика
Казахстан)**

Major Railway Line



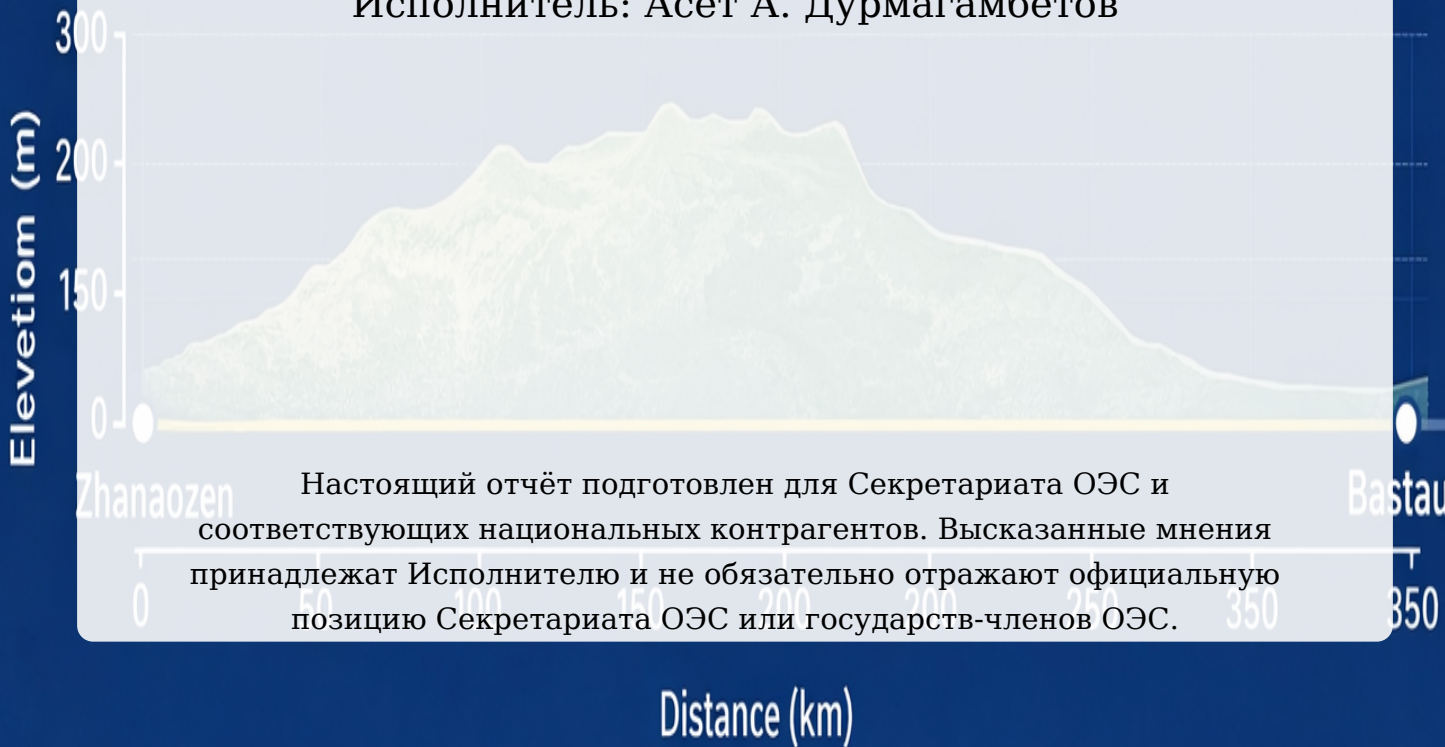
KTI Railway Control

Подготовлено для Секретариата Организации
экономического сотрудничества (ОЭС), Тегеран, 2025

Подготовлено в соответствии с Контрактом от 30
октября 2025 года и Техническим заданием (ТЗ).

Longitudinal Profile

Исполнитель: Асет А. Дурмагамбетов



Краткий обзор

Пилотный проект по цифровому моделированию пути (ЦМП) для участка Жанаозен–Бастау коридора Казахстан–Туркменистан–Иран (КТИ) подтверждает, что развертывание подходящей цифровой модели пути технически осуществимо и экономически оправдано в условиях ОЭС. Промежуточный отчёт Исследования был рассмотрен государствами-членами ОЭС, с получением отзывов от туркменской и иранской сторон. Туркменская сторона подтвердила использование российского технического решения, в то время как иранская сторона указала, что в настоящее время эксплуатируется устаревшее австрийское решение, которое не полностью соответствует современным требованиям цифровизации. В этом контексте Иранские железные дороги выразили интерес к более всестороннему последующему Исследованию с расширенным охватом, которое потребует ориентировочного бюджета в размере 350–500 тыс. долл. США, возможно, с поддержкой международных организаций, фондов развития и международных финансовых институтов.

Количественная оценка демонстрирует:

- положительную чистую приведённую стоимость (ЧПС) во всех рассмотренных сценариях;
- период окупаемости примерно 2–3 года в сценарии базового случая;
- внутренние нормы доходности (ВНД), в целом соответствующие международным эталонам для цифровых железнодорожных проектов и проектов управления активами.

Пилот подтверждает, что относительно скромные инвестиции в цифровое моделирование пути могут принести существенные экономические и операционные преимущества. Цифровое моделирование в этом Исследовании понимается как интегрированная система, сочетающая инфраструктуру физических измерений (аппаратное обеспечение) и аналитическое программное обеспечение для поддержки принятия решений, поддерживаемая соответствующими механизмами управления и управления данными. Такой интегрированный подход позволяет добиться значительной экономии на обслуживании пути, сократить перерывы в обслуживании и

поддерживать более безопасные и надёжные операции вдоль стратегических региональных коридоров.

В отношении аппаратной компоненты международный опыт показывает, что современные инспекционные и диагностические решения с конкурентоспособной общей стоимостью владения особенно эффективны в коридорах, характеризующихся неоднородными условиями пути. Решения, широко развернутые в крупных железнодорожных системах, включая те, что происходят из КНР, могут снизить частоту отказов и гарантийные риски для подвижного состава и инфраструктурных активов. Это создаёт благоприятные условия для привлечения международных источников финансирования, включая банки, поддерживающие экспортно-ориентированные железнодорожные технологии и стремящиеся снизить операционные риски и риски жизненного цикла.

Программная компонента ЦМП рассматривается в отчёте через прозрачную и проверяемую математическую структуру, связывающую геометрию пути, динамические силы, зоны риска и решения по обслуживанию с экономическими результатами. Подробные расчёты ЦМП, представленные в Исследовании, демонстрируют, что подход избегает зависимости от непрозрачных или «чёрных ящиков» решений и предоставляет прочную основу для инженерных и инвестиционных решений.

Исследование также демонстрирует банковскую привлекательность предлагаемого подхода. Государства-члены ОЭС уже выделяют национальные бюджетные средства на строительство, реконструкцию и обслуживание железных дорог в индивидуальном порядке. Предоставляя количественный и credible механизм экономии затрат и повышения эффективности, ЦМП создаёт стимулы для координации и открывает возможность структурирования синдицированного финансирования для поддержки цифровизации на уровне коридора. Такое финансирование может быть мобилизовано на льготных условиях через международные банки развития и фонды, включая те, что связаны с рамками экспортного финансирования. Предлагаемая модель реализации предусматривает разработку минимально жизнеспособного продукта (МЖП) на уровне коридора, за которым следует создание национальных операторов в каждой участвующей стране, с обработкой данных на националь-

ных серверах для обеспечения суверенитета данных, снижения рисков и надёжного обслуживания долга. В то же время подход соответствует стандартным критериям грантовой приемлемости, включая охрану окружающей среды, устойчивое развитие, развитие человеческого капитала и эффективность общественного бюджета.

Настоящий отчёт предоставляет:

- краткое обоснование ЦМП как инструмента для железных дорог ОЭС;
- справочную архитектуру и минимальную техническую спецификацию для Цифровой модели пути, соответствующую международной хорошей практике и нуждам ОЭС;
- дорожную карту реализации для пилотного участка Жанаозен–Бастау (8 недель), включая управление, этапы и результаты;
- экономическую модель, связывающую качество геометрии, динамические силы и затраты на обслуживание;
- оценку международного опыта (SBB, США/ЕС, РЖД/КТЖ, КНР) и его применимости к коридорам ОЭС;
- рекомендации по масштабированию подхода по государствам-членам ОЭС, включая варианты привлечения международных финансовых институтов (МФИ) и технологических партнёров.

Пилотный участок Жанаозен–Бастау предлагается в качестве демонстрационного случая для:

- интеграции инженерных данных геометрии, данных о состоянии (ПУ-32) и операционной информации в единую цифровую модель;
- демонстрации прозрачных, проверяемых и данных-ориентированных решений по обслуживанию и инвестициям;
- поддержки разработки стандарта ОЭС для цифрового моделирования пути и последующего развертывания на уровне коридора.

Содержание

1 Введение	6
1.1 Контекст	6

1.2	Основание задания	7
1.3	Объект анализа	7
1.4	Исходные материалы	7
2	Актуальность и стратегическое обоснование	8
2.1	Макроэкономическая перспектива	8
2.2	Соответствие повесткам ОЭС и глобальным	9
3	Цели и объём работ	9
3.1	Общая цель	9
3.2	Конкретные задачи	10
4	Методология	10
4.1	Аналитический подход	10
4.2	Данные и контроль качества	11
5	Обзор промежуточного отчёта государствами-членами ОЭС	11
6	Международный опыт цифрового моделирования пути	12
6.1	Сравнительный обзор	12
6.2	Ключевые уроки для ОЭС	13
7	Предположения и ограничения	14
8	План реализации пилота (8 недель)	15
9	Экономическая модель: КАПЗ, ОПЗ, ЧПС и ВНД	15
9.1	Структура затрат	16
9.2	Сценарии (5-летний горизонт, ставка дисконтирования 10%)	16
9.3	Производительность за 10 лет	16
9.4	Иллюстративные графики	17
10	Архитектура ЦМП и технические требования	18
10.1	Логическая архитектура	19

10.2	Технические требования	19
10.3	План П&В	20
11	Сравнительные варианты для реализации Фазы 2	20
11.1	Ключевые критерии оценки	21
11.2	Вариант А: GE + Infotrans конфигурация	21
11.3	Вариант В: CRRC + Локальное решение	22
11.4	Ориентировочная сравнительная матрица	23
11.5	Рекомендуемый подход для ОЭС	25
12	Модальность реализации и график платежей	26
13	Требования к исполнителю	27
14	Экспертная оценка пилотного участка и ключевые ре-	
	комендации	27
14.0.1	Институциональные и управленческие предпосыл-	
	ки	28
А	Соответствие требованиям ТЗ и КПЭ	29
А.1	Применение анализа SWOT	29
А.2	Применение критериев SMART	30
А.3	Экономическая оценка: КАПЗ и ОПЗ	32
А.4	Соответствие Ключевым показателям эффективности (КПЭ)	33
В	Ссылки	33
С	Регистр исходных материалов	34
Д	Глоссарий	35

1. Введение

1.1 Контекст

Настоящий отчёт подготовлен в соответствии с утверждённым Техническим заданием и структурирован для обеспечения ясности, прозрачности и соответствия международно принятым практикам отчётности.

Техническое задание состоит из пяти основных пунктов. Настоящий отчёт предоставляет подробный анализ и обоснование первых четырёх пунктов Технического задания. Пятый пункт предоставляется в форме презентационных материалов, которые предоставлены как самостоятельная презентация и служат дополнением к отчёту, предлагая краткий и визуальный обзор ключевых выводов, предположений и заключений.

Такое разделение между аналитическим отчётом и презентационными материалами соответствует международным лучшим практикам для технических и feasibility исследований, обеспечивая как методологическую строгость, так и эффективную коммуникацию результатов для лиц, принимающих решения.

Государства-члены ОЭС инвестируют значительные средства в железнодорожную инфраструктуру для поддержки региональной связности, упрощения торговли и диверсификации транзитных маршрутов. В то же время фискальное пространство ограничено, и менеджеры инфраструктуры ожидают:

- снижения затрат жизненного цикла;
- улучшения безопасности и надёжности;
- интеграции с цифровыми системами торговли и транспорта.

Цифровое моделирование пути (ЦМП) — это практический, технически зрелый инструмент для достижения этих целей. В отличие от чисто концептуальных нарративов «цифровых близнецов», предлагаемый подход ЦМП фокусируется на:

- точном представлении геометрии пути и связанных активов;
- систематической связи с диагностикой и историей обслуживания;
- прозрачной экономической оценке стратегий обслуживания.

1.2 Основание задания

Задание основано на:

- Контракте между Секретариатом ОЭС и Исполнителем от 30 октября 2025 года;
- Техническом задании: Исследование по цифровому моделированию для железных дорог ОЭС (2025);
- решениях и рекомендациях соответствующих органов ОЭС (РПС, СКТТ, ГПУ).

Пилот ЦМП на Жанаозен–Бастау разработан как проект с низкими затратами и высокой демонстрационной ценностью для иллюстрации преимуществ данных-ориентированного обслуживания и планирования в реалистичном операционном контексте.

1.3 Объект анализа

Основной объект — участок Жанаозен–Бастау (операционная длина ок. 35 км), часть транспортного коридора КТИ. Для моделирования и масштабируемости периметр 35 км рассматривается в соответствии с требованием ТЗ (географический периметр до 35 км).

1.4 Исходные материалы

Ключевые входные данные включают:

- Наборы данных КТЖ: геометрия, формы ПУ-32, списки инженерных сооружений, технические параметры;
- Документация Секретариата ОЭС и ТЗ;
- международные ссылки и технические статьи по цифровому моделированию пути.

Анализ местности показывает, что железнодорожный коридор КТИ преимущественно проходит по ровным и слегка волнистым районам. Это представляет значительное конкурентное преимущество по сравнению с альтернативными коридорами ОЭС, проходящими через горные и предгорные регионы.

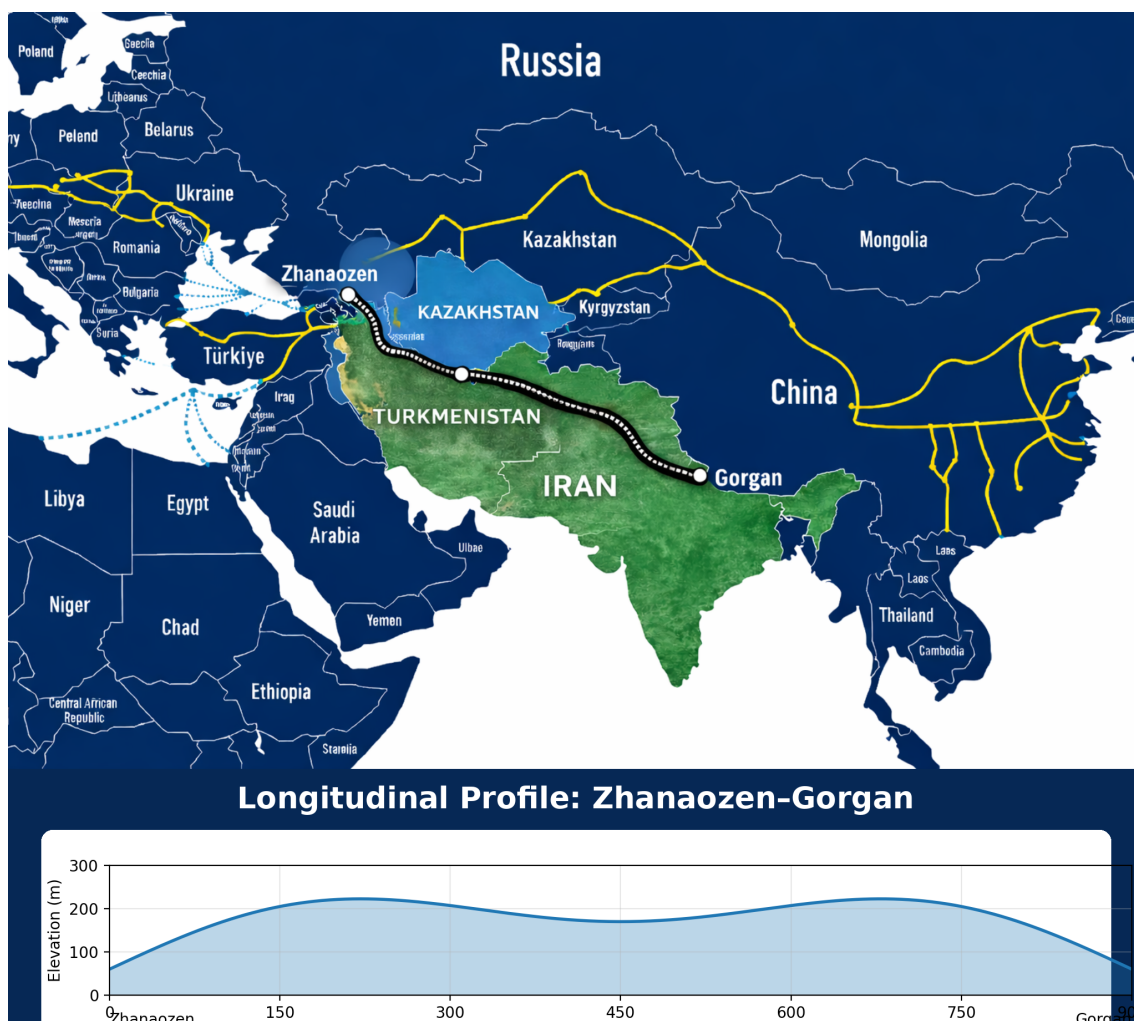


Рис. 1: Железнодорожный коридор КТИ: Общая трассировка маршрута с рельефом местности

2. Актуальность и стратегическое обоснование

2.1 Макроэкономическая перспектива

Средние затраты на строительство железных дорог 2–10 млн долл. США за км, в сочетании с растущими расходами на обслуживание, подчёркивают важность оптимизации как КАПЗ, так и ОПЗ. Для государств-членов ОЭС:

- большие участки сети находятся в суровых климатических и геотехнических условиях;
- грузовые потоки волатильны и чувствительны к производи-

тельности коридора;

- бюджетные ограничения ограничивают возможности полной реконструкции.

Систематический, цифровой подход к состоянию пути и геометрии позволяет:

- целевые вмешательства вместо сплошных ремонтов;
- приоритизацию участков с наивысшим экономическим и безопасным воздействием;
- лучшее обоснование финансирования и финансирования правительствам и МФИ.

2.2 Соответствие повесткам ОЭС и глобальным

Инициатива ЦМП соответствует:

- Видению ОЭС 2025 и последующим стратегиям региональной связности;
- ЦУР, в частности ЦУР 9 (Промышленность, инновации и инфраструктура) и ЦУР 13 (Борьба с изменением климата);
- рекомендациям ЭСКАТО ООН и ЕЭК ООН по цифровизации транспортных коридоров и гармонизации данных;
- стандартам ООН/ЦЕФАКТ для электронного обмена данными, поддерживающими мультимодальный транспорт.

Стратегическая оценка инициативы Цифрового моделирования пути (ЦМП) также применяла рамку SWOT для идентификации ключевых сильных сторон, слабостей, возможностей и угроз, связанных как с пилотной реализацией, так и с потенциальным масштабированием по коридорам железных дорог ОЭС. Результаты этого анализа суммированы в Приложении А (Соответствие требованиям ТЗ и КПЭ).

3. Цели и объём работ

3.1 Общая цель

Продemonстрировать через практический пилот, что Цифровое моделирование пути:

- технически достижимо с реальными данными и инструментами, доступными в железных дорогах ОЭС;
- приносит измеримые экономические преимущества в терминах сниженных затрат жизненного цикла;
- может быть кодифицировано в масштабируемый стандарт ОЭС.

3.2 Конкретные задачи

1. Обзор международного опыта (SBB, США/ЕС, РЖД/КТЖ, КНР и другие) в цифровом моделировании пути и активов.
2. Определение и документирование предположений и ограничений, релевантных для сетей ОЭС.
3. Разработка плана реализации пилота на 8 недель для участка Жанаозен–Бастау.
4. Дизайн архитектуры ЦМП, включая модель данных, интерфейсы и рамку П&В.
5. Построение экономической модели, связывающей качество геометрии, динамические нагрузки и затраты на обслуживание.
6. Предложение управления, управления рисками, КПЭ и отчётных механизмов.
7. Предоставление рекомендаций по масштабированию по ключевым коридорам ОЭС.

Цели Исследования и пилотной реализации были сформулированы и оценены в соответствии с критериями SMART (Specific, Measurable, Achievable, Relevant and Time-bound), обеспечивая ясность объёма, проверяемость результатов и соответствие Техническому заданию. Более подробная информация предоставлена в Приложении А.

4. Методология

4.1 Аналитический подход

Исследование сочетает:

- обзор международных стандартов, руководств и кейсов;
- анализ данных пути КТЖ (геометрия, ПУ-32, сооружения) для пилотного участка;

- упрощённое, но прочное моделирование нагрузок, связанных с кривизной, и затрат на обслуживание;
- анализ сценариев для КАПЗ/ОПЗ и скорректированных по риску доходов;
- качественную оценку институциональной и технической готовности.

4.2 Данные и контроль качества

Источники данных проверяются на:

- полноту и охват для пилотного участка;
- последовательность между геометрией, сооружениями и оценками ПУ-32;
- правдоподобность ключевых параметров (радиус, возвышение, скорости, нагрузки на ось).

Предлагаемая рамка ЦМП встраивает:

- процессы ETL с правилами валидации;
- воспроизводимые расчёты для поддержки решений;
- чёткое разделение между сырыми данными, обработанными индикаторами и рекомендациями.

5. Обзор промежуточного отчёта государствами-членами ОЭС

Промежуточный отчёт Исследования по развитию железнодорожного коридора КТИ был представлен на рассмотрение заинтересованным государствам-членам Организации экономического сотрудничества (ОЭС).

На основе полученных официальных ответов:

- туркменская сторона сообщила, что в настоящее время используется российское техническое решение для планирования и управления железнодорожной инфраструктурой;
- иранская сторона указала, что всё ещё используется устаревшее австрийское решение, которое не полностью соответствует современным требованиям цифровизации, интероперабель-

ности и развития потенциала.

Кроме того, Иранские железные дороги выразили интерес к более всестороннему и углублённому Исследованию, аналогичному настоящему, но с расширенным объёмом работ. Реализация такого Исследования потребует увеличения бюджета примерно до 1000-1200 тыс. долл. США, возможно, через вовлечение и поддержку международных организаций, фондов развития и финансовых институтов.

6. Международный опыт цифрового моделирования пути

6.1 Сравнительный обзор

Юрисдикция	Ключевые элементы	Наблюдаемое влияние
Швейцария (SBB)	Интегрированный BIM/ЦМП, унифицированный реестр активов, непрерывный контроль геометрии	Экономия жизненного цикла 10-20%; улучшенное планирование; сокращение времени владения путём
США/ЕС	Amtrak/FRA TGMS (Система измерения геометрии пути) и инспекционные вагоны, соответствующие EN 13848 , использующие LiDAR, IMU, RTK-GNSS; автоматизированная классификация дефектов и предиктивная аналитика.	Сокращение ограничений скорости; более целевое тампонирование и обновления; отсроченный КАПЗ
РЖД/КТЖ	Стандарты для колеи 1520 мм; связь моделей кривизны, возвышения и износа	Обслуживание на основе рисков; лучшая корреляция между геометрией и ухудшением

КНР	Высокоскоростные инспекционные поезда CRCC (например, CIT450, способные к инспекции на скорости 450 км/ч) с интегрированной геометрией пути (LiDAR/IMU), контактной сетью, сигнализацией, диагностикой и обнаружением аномалий на основе ИИ; модели реального времени для предиктивного обслуживания с использованием глубокого обучения для целевых ремонтов.	Более высокая утилизация (до 20% увеличения пропускной способности); сокращение задержек (на 30–50% через предиктивные вмешательства); сокращение простоев на обслуживании на 40%; снижение затрат жизненного цикла на 15–25% через целевые ремонты.
-----	---	--

6.2 Ключевые уроки для ОЭС

- Начните с фокусированного объёма: геометрия и состояние пути, не полный цифровой близнец всех активов.
- Используйте открытые, документированные структуры данных для избежания привязки к поставщику.
- Убедитесь, что выходы понятны инженерам пути и финансовым отделам.
- Рассматривайте ЦМП как ongoing процесс, не разовую съёмку.
- **Урок США/ЕС:** TGMS позволяет полностью автоматизированное обнаружение дефектов с субсантиметровой точностью, обеспечивая предиктивное обслуживание без человеческой инспекции.
- **Урок КНР:** Высокоскоростные инспекционные поезда, такие как CIT450, интегрируют мультисистемную диагностику с ИИ для обнаружения аномалий в реальном времени, достигая значительных приростов эффективности; однако их высокий КАПЗ и фокус на сетях 350+ км/ч делают их подходящими в основном как эталон для масштабируемых, модульных решений

в условиях ОЭС.

7. Предположения и ограничения

ID	Описание	Тип	Комментарий
A1	Своевременный доступ к данным КТЖ/ОЭС в машиночитаемых форматах	Предположение	SLA (Соглашение об уровне сервиса) с определёнными сроками ответа, контактными лицами
A2	Геопространственная точность основных наборов данных ≤ 1 см	Предположение	Поддержка RTK/LiDAR
A3	Совместимость с существующими стандартами и нормами 1520 мм	Предположение	Конфликты не ожидаются
A4	Ставка дисконтирования 10%	Предположение	Соответствует практикам ОЭС
A5	Вариация трафика в пределах $\pm 15\%$ от базового	Предположение	Вне диапазона запускает обновление
C1	Потолок бюджета пилота 10 000 долл. США	Ограничение	Требование ТЗ
C2	Реализация в течение 8 недель	Ограничение	Требование ТЗ
C3	Географический периметр до 35 км	Ограничение	Объём пилота (полностью применён)
C4	Интеграция уровня МЖП (API или на основе файлов)	Ограничение	Без полной перестройки ИТ
C5	Контроль изменений через Группу управления и ЗИ	Ограничение	Дисциплина управления

8. План реализации пилота (8 недель)

План реализации и результаты Исследования полностью соответствуют Ключевым показателям эффективности (КПЭ), определённым в Техническом задании. Эти КПЭ понимаются как успешная доставка указанных выходов, а не технических метрик, и включают: международный обзор, технические требования, экономическую модель, окончательное техническое задание и презентацию. Формальное сопоставление всех КПЭ с соответствующими результатами и разделами отчёта предоставлено в Приложении А.

Недели	Деятельности	Ворота / Приёмка
1-2	Мобилизация заинтересованных сторон; соглашения о доступе к данным; прототип ETL; начальный анализ геометрии и ПУ-32	Ворота 1: подтверждена доступность и качество данных
3-4	Определение модели данных ЦМП; дизайн архитектуры и интерфейсов; выбор инструментов и форматов	Ворота 2: технический дизайн одобрен Группой управления
5-6	Калибровка экономической модели; валидация КПЭ; план П&В; черновые результаты для пилотного участка	Ворота 3: методологический пакет одобрен
7-8	Консолидированные результаты пилота; окончательный отчёт; рекомендации; ТЗ для Фазы 2 (масштабирование) подготовлено в соответствии с требованиями ОЭС	Ворота 4: окончательные результаты приняты

9. Экономическая модель: КАПЗ, ОПЗ, ЧПС и ВНД

Экономическая оценка пилота Цифрового моделирования пути (ЦМП) основана на чётком разделении между капитальными расходами (КАПЗ) и операционными расходами (ОПЗ). Это различие обеспе-

чивает прозрачность предположений о затратах и предоставляет прочную основу для расчёта стандартных показателей эффективности инвестиций, включая Чистую приведённую стоимость (ЧПС), Внутреннюю норму доходности (ВНД) и период окупаемости. КАПЗ и ОПЗ применяются как экономические входные параметры, а не как Ключевые показатели эффективности (КПЭ), в соответствии с критериями оценки, изложенными в Техническом задании и суммированными в Приложении А.

9.1 Структура затрат

Категория	КАПЗ (долл. США)	ОПЗ (долл.)
Оборудование съёмки / датчики	2 500	3 000
Программное обеспечение / лицензии / облако	1 200	2 000
Обработка данных / аналитика	3 000	4 000
Обучение / развитие потенциала	1 000	1 000
Мониторинг / поддержка	0	6 000
Итого	7 700	16 000

9.2 Сценарии (5-летний горизонт, ставка дисконтирования 10%)

Сценарий	КАПЗ (долл. США)	ОПЗ/год (долл. США/год)	Чистая выгода/год (долл. США/год)	Окупаемость (лет)	ЧПС (5 лет) (долл. США)
Консервативный	7 700	1 600	2 400	3.2	1 400
Базовый слу- чай	7 700	1 600	3 400	2.3	5 200
Оптимистичный	7 700	1 600	5 400	1.4	12 800

9.3 Производительность за 10 лет

Сценарий	Чистая выгода/год (долл. США)	Окупаемость (лет)	ЧПС (Базовый горизонт) (долл. США)	ЧПС (10 лет) (долл. США)
Консервативный	2 400	3.21	1 397.89	7 046.96
Базовый слу- чай	3 400	2.26	5 188.68	13 191.53
Оптимистичный	5 400	1.43	12 770.25	25 480.66

Ориентировочная ВНД:

- 22–25% (Консервативный),
- 36–40% (Базовый случай),
- выше 60% (Оптимистичный).

9.4 Иллюстративные графики

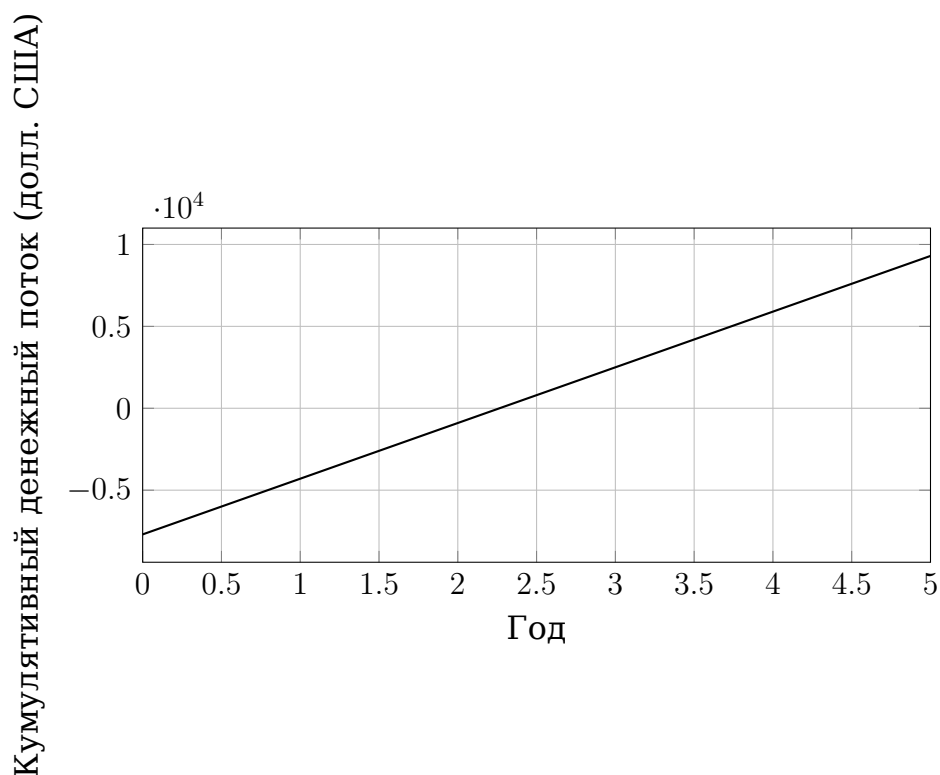


Рис. 2: Кумулятивный денежный поток, сценарий базового случая.

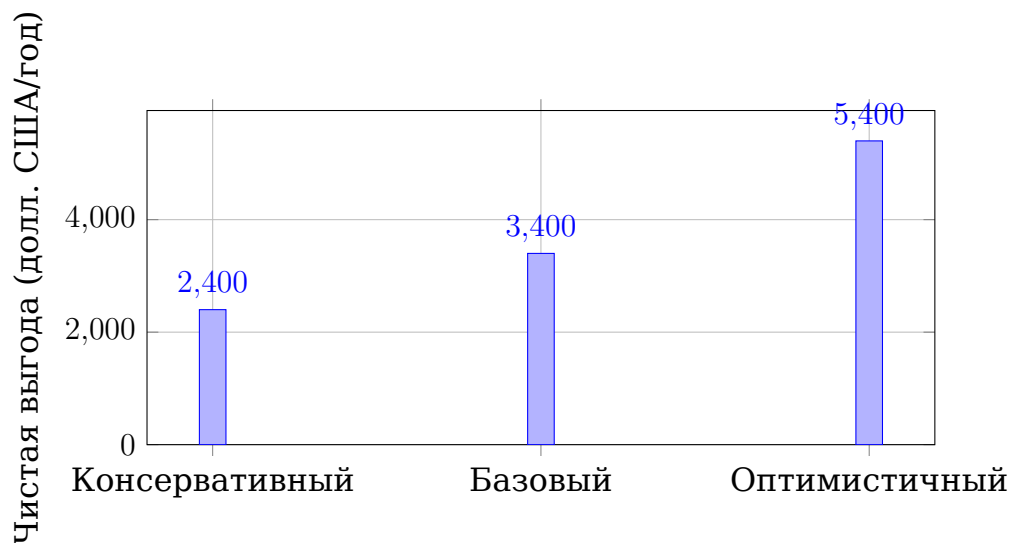


Рис. 3: Годовые чистые выгоды по сценариям.

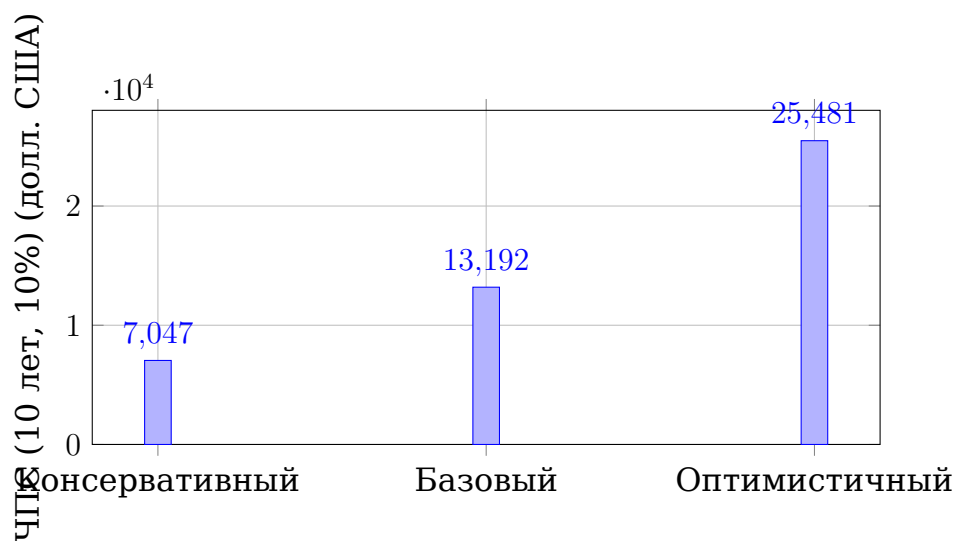


Рис. 4: ЧПС за 10 лет по сценариям.

10. Архитектура ЦМП и технические требования

Техническая архитектура и требования, определённые в этом разделе, составляют один из основных результатов Исследования в соответствии с Техническим заданием. Они поддерживают достижение ожидаемых исходов и принятых критериев, включая техническую осуществимость, масштабируемость и соответствие междуна-

родной хорошей практике, как далее документировано в Приложении А.

10.1 Логическая архитектура

- 1. **Слой данных:** геометрия, диагностика, сооружения, операции, окружающая среда.
- 2. **ETL & Качество:** конвейеры ingestion, правила валидации, журналы ошибок.
- 3. **Моделирование:** кривизна κ , возвышение h , переходные кривые, зоны риска.
- 4. **Аналитика:** модели затрат, ЧПС/ВНД/ДОХ, симуляции сценариев.
- 5. **Интерфейсы:** API/обмен файлами с системами КТЖ и ОЭС; отчётность.
- 6. **Безопасность:** RBAC, шифрование, аудит; данные на национальных серверах.

10.2 Технические требования

Компонент	Требования
Данные геометрии	Точность ≤ 1 мм; форматы: CSV/GeoJSON; поля: РК, x, y, z, κ, h
Диагностика	Формы ПУ-32 в структурированном формате; поля: дефект, степень, дата, ремонт
ETL	Автоматизированная обработка; валидация: полнота, диапазон, последовательность
Модель	Математическая: $F = mv^2\kappa$; зоны риска по порогам
Аналитика	Расчёт ЧПС/ВНД; сценарии: консервативный/базовый/оптимистичный
Интерфейсы	REST API; аутентификация: OAuth/JWT
Хранение	Локальное/облачное; резервное копирование: ежедневное; восстановление: <4 часов
П&В	Планы тестирования: единичные, интеграционные; метрики: IoU/RMSE для геометрии

Управление	СМ для версий; CR для изменений; SLA для поддержки
------------	--

10.3 План П&В

- **Проверка:** соответствие спецификациям (точность, покрытие).
- **Валидация:** полезность для пользователей (инженеры, менеджеры).
- **Метрики:** RMSE для геометрии; точность расчётов затрат.

11. Сравнительные варианты для реализации Фазы 2

Успешное завершение пилота Жанаозен-Бастау (периметр 35 км) создаёт платформу для более крупномасштабного развертывания Фазы 2 решений Цифрового моделирования пути (ЦМП) на приоритетных коридорах ОЭС. Для Фазы 2 рассматриваются два ориентировочных технологических и поставочных конфигураций:

- **Вариант А: GE + Infotrans конфигурация** — модель партнёрства на основе установленного глобального поставщика диагностических и цифровых железнодорожных систем (портфель типа GE/Wabtec) в сочетании с региональным системным интегратором таким как Infotrans или эквивалентный партнёр на базе ОЭС.
- **Вариант В: CRRC + локальное решение** — конфигурация на основе китайских инспекционных и ЦМП технологий (например, инспекционные транспортные средства и подсистемы CRRC), интегрированная с программным обеспечением и услугами, предоставляемыми локальными поставщиками в регионе ОЭС.

Оба варианта технически осуществимы для железных дорог ОЭС и могут обеспечить уровни точности, требуемые концепцией ЦМП. Выбор должен быть обусловлен: (i) экономикой жизненного цикла, а не только начальным КАПЗ; (ii) проверяемой точностью и надёжностью; (iii) интеграцией, владением данными и мерами кибербез-

опасности; и (iv) локализацией навыков и поддержки в государствах-членах ОЭС.

11.1 Ключевые критерии оценки

Для Фазы 2 предлагаются следующие критерии:

1. **Точность и надёжность измерений:** достижимые допуски для геометрии (выравнивание, уровень, колея), повторяемость, стабильность калибровки и доступность протоколов проверки и валидации (П&В), соответствующих EN 13848 и релевантным стандартам 1520 мм.
2. **Общая стоимость владения (ОСП):** комбинированный КА-ПЗ/ОПЗ за 8–10 лет, включая аппаратное обеспечение, лицензии на ПО, облачную/локальную инфраструктуру, калибровку, обслуживание, обучение и обновления.
3. **Интеграция и интероперабельность:** открытость интерфейсов (API), доступность документированных моделей данных, лёгкость интеграции с системами КТЖ/ОЭС и национальными платформами управления активами.
4. **Локализация и развитие потенциала:** степень, в которой реализация строит устойчивый опыт в регионе (железные дороги ОЭС, университеты, инженерные фирмы), снижая зависимость от единственных иностранных поставщиков.
5. **Управление, риск и устойчивость цепочки поставок:** диверсификация поставщиков, устойчивость к экспортным контролям/санкциям, позиция кибербезопасности и контрактная ясность по владению данными.

11.2 Вариант А: GE + Infotrans конфигурация

Эта конфигурация предполагает использование зрелой диагностической и аналитической платформы западного происхождения, предоставляемой совместно с интегратором региона ОЭС.

Ключевые характеристики:

- **Точность:** современные системы на основе лазера/IMU обычно достигают субмиллиметрового до миллиметрового разрешения по ключевым параметрам и предназначены для соот-

ветствия стандартам типа EN 13848 и установленным режимам приёмки, используемым европейскими и североамериканскими железными дорогами.

- **Зрелость системы:** долгий операционный опыт на коридорах смешанного трафика; проверенные наборы инструментов для анализа тенденций, порогов тревоги, классификации дефектов и интеграции в управление активами предприятия.
- **Ориентировочный профиль затрат:**
 - более высокие начальные лицензии и сборы за интеграцию;
 - предсказуемые циклы поддержки и обновлений;
 - потенциал для рамочных соглашений, охватывающих несколько железных дорог ОЭС и снижающих удельные затраты в масштабе.
- **Интеграция:** сильная поддержка документированных API и экспорта сырых и обработанных данных; соответствие открытому, нейтральному к поставщику архитектуре ЦМП, предложенной в этом отчёте.
- **Риски:** подверженность колебаниям валюты и режимам экспортного контроля; необходимость чётких договорённостей для обеспечения хостинга данных в юрисдикциях ОЭС и передачи знаний локальному персоналу.

Вариант А хорошо подходит там, где приоритет: (i) максимальная прозрачность алгоритмов и интерфейсов, (ii) сильное соответствие ожиданиям ЕС/МФИ по безопасности и кибербезопасности, и (iii) эталонная «справочная» реализация для стандартизации по ОЭС.

11.3 Вариант В: CRRC + Локальное решение

Эта конфигурация использует инспекционные технологии и подвижной состав китайского происхождения, в сочетании с локальными возможностями ПО и аналитики в странах ОЭС.

Ключевые характеристики:

- **Точность:** Системы инспекции типа CRRC, применяемые на высокоскоростных и тяжёлых грузовых сетях в Азии, также обеспечивают высокую точность для геометрии, колеи, профиля и дефектов; они подходят для интенсивного мониторин-

га и рамок предиктивного обслуживания при валидации со стороны ОЭС.

- **Ориентировочный профиль затрат:**
 - во многих случаях конкурентный или более низкий удельный КАПЗ для пакетов датчиков и оборудования на пути, особенно когда поставляется как часть более широкой программы подвижного состава или сигнализации;
 - потенциал снижения затрат через локальное производство или сборку;
 - ОПЗ сильно влияет на локализацию обслуживания и доступность локальных партнёров по сервису.
- **Потенциал локализации:** сильный объём для структурирования проектов так, чтобы университеты, проектные институты и ИТ-компании на базе ОЭС совместно разрабатывали слои аналитики ЦМП, дашборды и компоненты интеграции.
- **Интеграция и политика данных:** эффективное использование в рамках ОЭС ЦМП требует:
 - полного доступа к сырым потокам измерений и документации;
 - контрактных гарантий владения данными менеджерами инфраструктуры;
 - избежания закрытых, proprietary форматов, ограничивающих интероперабельность.
- **Риски:** потенциальная неоднородность между поставляемыми подсистемами, зависимость от конкретных поставщиков или протоколов, если интеграция не тщательно стандартизирована, и необходимость проверки соответствия требованиям ОЭС по кибербезопасности и конфиденциальности.

Вариант В привлекателен там, где: (i) эффективность затрат и быстрое развертывание на длинных коридорах критичны, и (ii) есть чёткая стратегия инвестиций в локальный инженерный потенциал и выравнивания форматов данных и API со стандартами ОЭС с самого начала.

11.4 Ориентировочная сравнительная матрица

Критерий	Вариант А: GE + Infotrans	Вариант В: CRRC + Локальное решение
Точность измерений	Доказанная точность на уровне мм; зрелые процессы QA/П&В; сильное соответствие EN 13848	Высокая точность, продемонстрированная на китайских высокоскоростных и тяжёлых грузовых линиях; требуется верификация для конкретных случаев ОЭС
Ориентировочная ОСП за 10 лет	Более высокий КПЗ/лицензии; стабильные затраты на поддержку; благоприятный при многострановом масштабе, если используется гармонизированная закупка	КА-Потенциально более низкий КАПЗ; ОПЗ зависит от локальной экосистемы сервиса; благоприятный, где сильны локальные партнёры
Интеграция и открытость	Обычно сильная поддержка API; легче поставление с открытой схемой ЦМП ОЭС; более низкий риск блокировки данных при чётких контрактах	Требуется тщательных переговоров по форматам данных/доступу API; осуществимо, но больше вариаций по реализациям
Локализация навыков	Опирается на структурированное обучение и регионального интегратора; хорошо, если построено в обязательные программы обучения/передачи	Высокий потенциал для совместной разработки с локальными фирмами и университетами; поддерживает передачу технологий, если формально мандатировано

Критерий	Вариант А: GE + Infotrans	Вариант В: CRRC + Локальное решение
Риск цепочки поставок и геополитический	Подверженность транс-атлантической регуляторной среде; сказуемо, но подлежит экспортного контроля	Подверженность цепочкам поставок, цен-трированным на КНР; поставка устойчивая аппаратного обеспечения, но ОЭС должна выровнять политики данных/безопасности
Подходящесть для Фазы 2 ОЭС	Сильный кандидат для «справочной» платформы ЦМП ОЭС и программ, финансируемых МФИ, подчёркивающих прозрачность и стандарты	Сильный кандидат для экономически эффективного масштабирования, особенно с прочной локальной интеграцией и обязательствами по открытым данным

11.5 Рекомендуемый подход для ОЭС

Для Фазы 2 рекомендуется, чтобы ОЭС и участвующие железные дороги:

- приняли **технологически нейтральное, основанное на стандартах ТЗ**, позволяющее обоим конфигурациям (и другим квалифицированным поставщикам) конкурировать по общим техническим и экономическим критериям;
- требовали от всех претендентов:
 1. предоставления полного доступа к сырым и обработанным данным геометрии;
 2. документирования API и структур данных, совместимых с моделью ЦМП ОЭС;
 3. обязательств по обучению на месте и совместным упражнениям П&В с железными дорогами ОЭС.
- оценивали предложения по **ЧПС/ВНД за 8-10 лет**, не только по начальной цене оборудования, с явным баллом за локали-

зацию, кибербезопасность и долгосрочную поддержку;

- рассмотрели **стратегию двойного пилота**, в которой: один коридор принимает конфигурацию типа Вариант А, а другой — конфигурацию типа Вариант В, оба сопоставленные с одним и тем же стандартом ЦМП ОЭС, для бенчмаркинга производительности, затрат и институциональной подгонки в реальных условиях ОЭС.

Это сохраняет конкуренцию, снижает зависимость от единственного поставщика и обеспечивает, что какая бы комбинация поставщиков ни была выбрана для Фазы 2, она будет работать полностью в рамках Стандарта цифрового моделирования пути ОЭС, разработанного на основе пилота Жанаозен-Бастау.

12. Модальность реализации и график платежей

Клиентские учреждения: Министерство транспорта Казахстана, соответствующие органы Ирана и Туркменистана, в координации с Секретариатом ОЭС.

Группа управления надзирает:

- валидацию плана работы;
- обзор промежуточных результатов;
- приёмку окончательных выходов и рекомендаций.

Этап	Доля цены контракта
Ворота 1 (Данные и план)	20%
Ворота 2 (Дизайн одобрен)	30%
Ворота 3 (Модель и КПЭ)	30%
Ворота 4 (Окончательный отчёт)	20%

13. Требования к исполнителю

- Демонстрированный опыт в цифровом моделировании или данных-ориентированном управлении активами для транспортной инфраструктуры (желательно железных дорог).
- Способность работать с Секретариатом ОЭС и множественными национальными заинтересованными сторонами.
- Возможность доставки прозрачных, документированных и воспроизводимых аналитических инструментов.

14. Экспертная оценка пилотного участка и ключевые рекомендации

Пилотный участок Жанаозен–Бастау (операционная длина 35 км; периметр пилота 35 км) был оценён с использованием предлагаемой рамки Цифровой модели пути (ЦМП).

Экспертная оценка подтверждает:

1. Существующая трассировка и геометрия ограничивают безопасное и экономическое увеличение скоростей грузов без целевых корректировок.
2. Эффективное ограничение 50 км/ч на критических подучастках может снизить потенциальную пропускную способность примерно на 20–25% относительно оптимизированного сценария геометрии.
3. ЦМП позволяет идентифицировать места для незначительных улучшений трассировки и возвышения с измеримыми приростами производительности, поддерживает обслуживание на основе рисков и связывает геометрию с затратами.
4. При консервативных предположениях пилот ЦМП даёт положительную ЧПС, короткую окупаемость (около 1.5–3 лет) и ВНД на уровне или выше эталонов МФИ.
5. Концепция масштабируема по коридорам ОЭС и соответствует ongoing инициативам цифровизации.

Ключевые рекомендации:

- принять пилот Жанаозен–Бастау как справочный случай для

Стандарта цифрового моделирования пути ОЭС;

- реализовать поэтапное масштабирование на приоритетных коридорах ОЭС;
- привлекать квалифицированных технологических партнёров под открытыми, неисключающими договорённостями, обеспечивая, что владение данными остаётся у государств-членов ОЭС и менеджеров инфраструктуры;
- использовать доказательства на основе ЦМП для подготовки предложений финансирования для AIIB, IsDB, ADB, EDB и других.

14.0.1. Институциональные и управленческие предпосылки

Хотя техническая осуществимость и экономическое обоснование Цифровой модели пути (ЦМП) были продемонстрированы через пилот Жанаозен–Бастау, оценка показывает, что полная реализация её преимуществ зависит от скоординированных институциональных и управленческих механизмов среди участвующих стран.

В частности, дальнейший прогресс требует гармонизации методологий для расследования и разрешения операционных и конфликтных ситуаций, выравнивания подходов к оценке состояния пути и последовательности в стандартах данных, интерпретации и процедурах принятия решений. Без такого выравнивания цифровые решения рискуют остаться фрагментированными и ограниченными изолированными национальными приложениями.

Решение этих предпосылок позволит постепенный переход от индивидуальных цифровых инициатив к совместно управляемому и интероперабельному Цифровому железнодорожному коридору. Этот переход подразумевает разработку и принятие общих регуляторных и нормативных рамок на уровне ОЭС, обеспечивающих предсказуемую и прозрачную основу для трансграничной координации и долгосрочного инвестиционного планирования.

С точки зрения управления, создание постоянного стоячего координационного комитета считается практическим и эффективным механизмом для поддержки этого процесса. Такой орган будет мандатирован координировать разработку, утверждение и периодиче-

ское обновление общих технических, методологических и цифровых стандартов, тем самым обеспечивая непрерывность, институциональную память и стабильную основу для инициатив цифровизации на уровне коридора.

Во время обсуждения промежуточных и пилотных результатов иранская сторона специально подчеркнула важность расширения объёма цифровой оценки за пределы только геометрии пути. В частности, внимание было обращено на состояние стрелок и переводов, а также на более широкий набор инфраструктурных и операционных параметров, которые не были полностью охвачены в рамках настоящего Исследования.

Эти дополнительные параметры, хотя и вне оригинального объёма, теперь артикулированы и признаны релевантными областями для дальнейшего развития. Настоящая работа поэтому рассматривается как катализатор, который может предоставить дальнейший импульс для последующих, более всесторонних оценок, опираясь на методологические, технические и институциональные основы, установленные через текущий пилот.

А. Соответствие требованиям ТЗ и КПЭ

Это Приложение демонстрирует полное соответствие настоящего Исследования утверждённому Техническому заданию (ТЗ), включая применение рамок SWOT и SMART, использование КАПЗ и ОПЗ в экономической оценке и доставку всех требуемых Ключевых показателей эффективности (КПЭ).

А.1 Применение анализа SWOT

Анализ SWOT был применён для структурирования стратегической оценки пилота ЦМП и его потенциального масштабирования по коридорам ОЭС, идентифицируя сильные стороны, слабости, возможности и угрозы, релевантные техническим, экономическим и институциональным измерениям.

Таблица 10: Анализ SWOT пилота Цифрового моделирования пути (ЦМП)

Сильные стороны	Слабости
Доказанная техническая осуществимость ЦМП на живом пилотном участке; Количественные экономические преимущества (положительная ЧПС, приемлемая ВНД); Прозрачная и проверяемая математическая методология; Совместимость с международными железнодорожными практиками.	Ограниченный объём пилота (фокус на параметрах, связанных с геометрией); Зависимость от доступности и качества входных данных; Начальная институциональная фрагментация по странам.
Возможности	Угрозы
Масштабирование по коридорам железных дорог ОЭС; Доступ к льготному финансированию и грантам; Разработка общего цифрового стандарта ОЭС; Развитие потенциала и локализация экспертизы.	Различные национальные регуляции и стандарты; Задержки в обмене данными и координации; Риск привязки к поставщику без чёткого управления; Неравномерный темп принятия цифровизации среди стран.

A.2 Применение критериев SMART

Формулировка целей Исследования и объёма пилотной реализации была руководствована рамкой SMART (Specific, Measurable, Achievable, Relevant and Time-bound), как явно требуется Техническим заданием. Применение критериев SMART обеспечило, что Исследование избегало абстрактных или декларативных целей и вместо этого фокусировалось на проверяемых, операционных и экономически значимых исходах.

Specific. Цели Исследования были определены с чётким и однозначным фокусом на пилотном участке Жанаозен–Бастау коридора КТИ, с географически ограниченным периметром примерно 35 км, в полном соответствии с ТЗ. Объём явно охватывал цифровое моделирование геометрии и состояния пути, экономическую оценку эффектов обслуживания и подготовку технически прочной основы для потенциального масштабирования. Никакие не связанные

активы или спекулятивные цифровые функции не были включены, обеспечивая хорошо определённый и контролируемый объём.

Measurable. Цели Исследования были переведены в измеримые выходы и индикаторы, включая количественные экономические метрики (ЧПС, ВНД, период окупаемости), определённые пороги точности для геометрических параметров и ясно идентифицируемые результаты (отчёты, технические спецификации, экономические расчёты и презентационные материалы). Эта измеримость позволяет независимую верификацию результатов и поддерживает прозрачный обзор органами ОЭС, национальными властями и потенциальными финансирующими институтами.

Achievable. Все цели были сформулированы с учётом существующих институциональных, технических и бюджетных ограничений. Пилот опирается на типы данных, технологии измерений и аналитические методы, которые уже доступны или реалистично развёртываемы в железных дорогах ОЭС. План реализации и предположения о затратах были намеренно консервативными, обеспечивая достижение целей в пределах согласованного бюджетного потолка и 8-недельного срока пилота.

Relevant. Цели Исследования напрямую соответствуют стратегическим приоритетам ОЭС, включая региональную связность, оптимизацию затрат жизненного цикла инфраструктуры, улучшение безопасности и надёжности железнодорожных операций и поддержку устойчивых транспортных коридоров. С экономической перспективы фокус на оптимизации КАПЗ и ОПЗ, банковской привлекательности и принятии решений на основе доказательств обеспечивает высокую релевантность для правительств, менеджеров инфраструктуры и международных финансовых институтов.

Time-bound. Все деятельности и результаты были структурированы в пределах чётко определённого и контрактно фиксированного периода реализации. Дорожная карта пилота указывает конкретные этапы, ворота приёмки и окончательные выходы, которые должны быть доставлены в течение восьми недель. Эта структура с привязкой ко времени поддерживает эффективный контроль проекта, своевременное принятие решений Секретариатом ОЭС и готовность к последующим фазам.

Подробная оценка целей Исследования по каждому критерию SMART суммирована в Таблице 11.

Таблица 11: Оценка целей Исследования по критериям SMART

Критерий	Применение в Исследовании
Specific	Демонстрация Цифрового моделирования пути на определённом пилотном участке Жанаозен-Бастау коридора КТИ, с чётко определённым объёмом и выходами.
Measurable	Количественные экономические индикаторы (ЧПС, ВНД, период окупаемости), метрики качества геометрии и чётко определённые результаты в соответствии с Техническим заданием.
Achievable	Реализация с использованием существующих технологий измерений, источников данных и институциональных механизмов в пределах согласованного срока и бюджета.
Relevant	Прямой вклад в цели ОЭС по эффективности железных дорог, безопасности, снижению затрат, устойчивости и конкурентоспособности коридоров.
Time-bound	Все деятельности и результаты завершены в пределах контрактного периода реализации, включая 8-недельную дорожную карту пилота.

Таблица подтверждает, что все КПЭ, определённые в Техническом задании, были полностью доставлены. Международный обзор, Технические требования, Экономическая модель и Окончательное техническое задание включены как посвящённые разделы Окончательного отчёта, в то время как Презентация предоставлена как отдельный файл для удобства.

А.3 Экономическая оценка: КАПЗ и ОПЗ

Экономическая модель явно отличает КАПЗ и ОПЗ как основные входы для оценки производительности инвестиций. Эти параметры лежат в основе расчёта ЧПС, ВНД и периода окупаемости, представленных в Разделе 9.

А.4 Соответствие Ключевым показателям эффективности (КПЭ)

Таблица 12: Соответствие Ключевым показателям эффективности (КПЭ), определённым в ТЗ

КПЭ ТЗ	Результат по ТЗ	Статус	Ссылка в Окончательном отчёте
Международный обзор	Аналитический отчёт	Завершён	Разделы 6-7 (Международный опыт и бенчмаркинг)
Разработаны технические требования	Документ технических требований	Завершён	Раздел 10 (Архитектура ЦМП и технические требования)
Завершена экономическая модель	Экономический расчёт	Завершён	Раздел 9 (Экономическая модель: КАПЗ, ОПЗ, ЧПС и ВНД)
Подготовлено окончательное техническое задание	Техническое задание для следующей фазы	Завершён	Раздел 19 (Экспертная оценка и ключевые рекомендации), включая объём Фазы 2
Разработана презентация	Файл презентации	Завершён	Приложение: Презентация (предоставлена как отдельный файл)

Таблица подтверждает, что все КПЭ, определённые в Техническом задании, были полностью доставлены. Международный обзор, Технические требования, Экономическая модель и Окончательное техническое задание включены как посвящённые разделы Окончательного отчёта, в то время как Презентация предоставлена как отдельный файл для удобства.

В. Ссылки

- Секретариат ОЭС (2025). Цифровое моделирование для железных дорог ОЭС — Документация контракта.
- ОЭС (2025). ТЗ — Исследование по цифровому моделированию для железных дорог ОЭС.
- КТЖ: Приложения 2-11, заявления о состоянии пути ПУ-32 (октябрь 2025).
- Ильяшева Г.И., Дурмагамбетов А.А. (2025). Экономическая модель для Цифрового моделирования пути.

Ссылка в Окончательном отчёте			
Международный обзор	Аналитический отчёт	Завершён	Разделы 6–7 (Международный опыт и бенчмаркинг)
Разработаны технические требования	Документ технических требований	Завершён	Раздел 10 (Архитектура ЦМП и технические требования)
Завершена экономическая модель	Экономический расчёт	Завершён	Раздел 9 (Экономическая модель: КАПЗ, ОПЗ, ЧПС и ВНД)
Подготовлено окончательное техническое задание	Техническое задание для следующей фазы	Завершён	Раздел 19 (Экспертная оценка и ключевые рекомендации), включая объём Фазы 2
Разработана презентация	Файл презентации	Завершён	Приложение: Презентация (предоставлена как отдельный файл)

С. Регистр исходных материалов

Файл	Версия
Annex No. 9,10,11.xlsx	2025-11-05
Reply to Request (19).docx	2025-11-05
Annex No. 7 List of Level Crossings Zhanaozen-Bastau.xls	2025-11-05
Contract Digital Railway Modelling, KTI Section.docx	2025-11-05
Annex No. 3 Technical Characteristics Zhanaozen-Bastau.docx	2025-11-05
ToR - Study on Railway Digital Modelling.docx	2025-11-05
Ilyasheva-Valikh.pdf	2025-11-05
Annex No. 8.docx	2025-11-05
Annex No. 6 List of Engineering Structures.docx	2025-11-05
Report (25).pdf	2025-11-05

Annex 2 PU-32 Track Condition 2025-11-05
Statements.pdf

D. Глоссарий

Термин	Определение
ОЭС	Организация экономического сотрудничества
РПС	Региональный плановый совет ОЭС
СКТТ	Совет по координации транзитного транспорта ОЭС
СПР	Совет постоянных представителей при ОЭС
ГПУ	Группа управления проектом ОЭС
ООН/ЦЕФАКТ	Центр ООН по упрощению процедур торговли и электронной торговле
ЭСКАТО ООН / ЕЭК ООН	Региональные комиссии ООН (Азиатско-Тихоокеанский регион / Европа)
СМГС	Соглашение о международном грузовом сообщении по железным дорогам
ЦМП	Цифровая модель пути
ПУ-32	Форма заявления о состоянии пути
κ	Кривизна, $\kappa = 1/R$
R	Радиус кривой
h	Возвышение наружного рельса
КАПЗ/ОПЗ	Капитальные / операционные расходы
ЧПС/ДОХ/ВНД	Показатели эффективности инвестиций
КПЭ	Ключевой показатель эффективности
ETL	Extract-Transform-Load
LiDAR/GPS	Высокоточные приборы геодезической съёмки
RTK/IMU	
BIM	Моделирование информационное зданий
П&В	Проверка и валидация
УК	Управление конфигурацией
IoU/RMSE	Метрики перекрытия / ошибки
КТЖ/РАИ/ТДЖ	Железные дороги Казахстана, Ирана, Туркменистана

AIIB/IsDB/ADB/EDB	Международные финансовые институты
ЗИ	Запрос на изменение
Группа управле-	Орган управления проектом
ния	
SLA	Соглашение об уровне сервиса
RBAC	Управление доступом на основе ролей
