



УНИВЕРЗИТЕТ „КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ СКОПЈЕ



Ивона Зоран Недевска Трајкова

**ГЕОМЕТРИСКО ДЕГРАДИРАЊЕ НА КОЛОСЕК КАЈ ЖЕЛЕЗНИЧКИ ПРУГИ И
НЕГОВО ОДРЖУВАЊЕ**

Докторски труд

Скопје, 2026



УНИВЕРЗИТЕТ „КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ СКОПЈЕ



Ивона Зоран Недевска Трајкова

**ГЕОМЕТРИСКО ДЕГРАДИРАЊЕ НА КОЛОСЕК КАЈ ЖЕЛЕЗНИЧКИ ПРУГИ И НЕГОВО
ОДРЖУВАЊЕ**

Докторски труд

Скопје, 2026

Докторанд:

ИВОНА ЗОРАН НЕДЕВСКА ТРАЈКОВА

Тема:

ГЕОМЕТРИСКО ДЕГРАДИРАЊЕ НА КОЛОСЕК КАЈ ЖЕЛЕЗНИЧКИ ПРУГИ И НЕГОВО
ОДРЖУВАЊЕ

Ментор:

Проф.д-р ЗОРАН КРАКУТОВСКИ

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Градежен факултет Скопје

Комисија за одбрана:

Проф.д-р ДАРКО МОСЛАВАЦ (претседател)

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Градежен факултет Скопје

Проф.д-р ЗОРАН КРАКУТОВСКИ,

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Градежен факултет Скопје

Проф.д-р ЗЛАТКО ЗАФИРОВСКИ,

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Градежен факултет Скопје

Проф.д-р МИЛОРАД ЈОВАНОВСКИ,

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Градежен факултет Скопје

Проф.д-р ЗОРАН БОНИЌ,

Универзитет во Ниш

Градежно – архитектонски факултет Ниш

Научна област:

ГРАДЕЖНИШТВО

Датум на одбрана:

(Ако датумот не е утврден, се додава дополнително рачно)

ГЕОМЕТРИСКО ДЕГРАДИРАЊЕ НА КОЛОСЕК КАЈ ЖЕЛЕЗНИЧКИ ПРУГИ И НЕГОВО ОДРЖУВАЊЕ

– А п с т р а к т –

Одржувањето на железничката инфраструктура е од суштинско значење за безбедното и непречено функционирање на системот, особено на делниците со поголема конструктивна комплексност и променливи услови на експлоатација. Иако современите европски практики се насочени кон модели засновани на податоци (data – driven модели) и модели засновани на перформанси за управување (performance – based модели), во регионот недостасуваат долгорочни анализи базирани на интегрирани технички и експлоатациони податоци што би овозможиле прецизно предвидување на деградацијата и оптимизација на интервенциите за одржување.

Целта на докторскиот труд е да се развие методолошка рамка за квантитативна анализа и предвидување на деградацијата на геометријата на колосекот на делницата на пругата Колашин – Подгорица, врз база на статистички модели и техники од машинско учење, комбинирани со систематска обработка на инфраструктурни и експлоатациони податоци. Во рамките на истражувањето се анализираат четири циклуси на мерења на геометријата на трасата (2017, 2019, 2022 и 2024), структурирани во делници со должина од 20 m, дополнети со податоци за хоризонталната и вертикалната геометрија, како и податоци од параметри кои се однесуваат на карактеристиките на инфраструктурата, одржувањето, геотехничките услови и сообраќајното оптоварување.

Применети се три статистички методи: линеарна регресиона анализа, полиномна и регулација на Тихонов (ridge regression), како и три методи за машинско учење кои ги имаат следните оригинални наслови: Random Forest, Support Vector Regression (SVR) и Multilayer Perceptron, сите валидирани со 5 кратна вкрстена валидација (5-fold cross-validation). Дополнително се изработени модели за анализа на стапката на деградација, парцијална (piecewise) регресија за идентификација на промени во трендот развиени модели и симулациски модели за утврдување на оптимална динамика и број на машински интервенции.

Резултатите покажуваат дека нелинеарните модели, особено Random Forest и SVR, обезбедуваат најниски предвидувачки грешки и највисока стабилност при моделирање на индексот на квалитет на колосекот (Track Quality Index – TQI). Анализата на влијателни параметри кои се однесуваат на карактеристиките на инфраструктурата потврдува дека радиусот на кривините, надолжните наклони и бројот на машински интервенции имаат најголемо влијание врз деградацијата. Утврдено е дека ефектот од машинските интервенции не е линеарен: постојат оптимални точки на фреквенција на интервенции за одржување, додека прекумерните интервенции водат до зголемена варијација на индексот на квалитет на колосекот (TQI) и забрзана деградација. Симулационите модели покажуваат дека избраните оптимални комбинации на интервенции овозможуваат значително подобрување на долгорочниот квалитет на колосекот.

Развиената методологија нуди основа за практична примена во системите за планирање на одржување, со потенцијал да ги намали трошоците, да ја зголеми доверливоста и да овозможи поефикасно планирање на ресурси. Трудот претставува чекор кон воспоставување на предвидувачко управување со железничката инфраструктура засновано на податоци за пругите во регионот и создава основа за понатамошни подобрувања во дигитализацијата и оптимизацијата на процесите за одржување.

Клучни зборови: железничка инфраструктура, геометрија на колосек, предвидувачко моделирање, план за одржување засновано на податоци, регресиони модели, статистички модели, машинско учење, стапка на деградација, машински интервенции на одржување.

RAILWAY TRACK GEOMETRY DEGRADATION AND MAINTENANCE STRATEGIES

– A b s t r a c t –

Maintenance of railway infrastructure is essential for the safe and uninterrupted operation of the system, particularly on sections characterized by higher structural complexity and variable operating conditions. Although contemporary European practice is increasingly oriented toward data-driven models and performance-based management approaches, the region still lacks long-term analyses based on integrated technical and operational data that would enable accurate prediction of degradation processes and optimization of maintenance interventions.

The objective of this study is to develop a methodological framework for the quantitative analysis and prediction of track geometry degradation on the Kolašin–Podgorica railway section, based on statistical models and machine-learning techniques combined with the systematic processing of infrastructure-related and operational information. The research analyzes four track geometry measurement cycles (2017, 2019, 2022, and 2024), structured into 20 m long segments, supplemented with data on horizontal and vertical geometry, as well as data for parameters related to infrastructure characteristics, maintenance activities, geotechnical conditions, and traffic loading.

Three statistical methods: linear, polynomial, and ridge regression—are applied, along with three machine-learning approaches that have the following original titles: Random Forest, Support Vector Regression (SVR), and Multilayer Perceptron, all validated using 5-fold cross-validation. In addition, models for degradation-rate analysis are developed, together with piecewise regression for identifying changes in degradation trends and simulation-based models for determining the optimal dynamics and number of mechanized maintenance interventions.

The results demonstrate that nonlinear models, particularly Random Forest and SVR, achieve the lowest prediction errors and the highest stability in modeling the Track Quality Index (TQI). The analysis of influential parameters confirms that curve radius, longitudinal gradients, and the number of mechanized interventions exert the strongest impact on degradation behavior. It is established that the effect of maintenance interventions is not linear: optimal frequency thresholds exist, whereas excessive interventions lead to increased variability of the Track Quality Index (TQI) and accelerated degradation. Simulation models further indicate that appropriately selected combinations of interventions enable substantial improvements in long-term track quality.

The proposed methodology provides a foundation for practical implementation within railway maintenance planning systems, with the potential to reduce costs, enhance reliability, and support more efficient resource allocation. This study represents a step toward establishing data-driven predictive management of railway infrastructure in the region and lays the groundwork for further advancements in the digitalization and optimization of maintenance processes.

Keywords: railway infrastructure, track geometry, predictive modelling, data-driven maintenance, regression models, statistical modelling, machine learning, degradation rate, tamping interventions.

Благодарност

Изразувам благодарност до мојот ментор за стручната поддршка, насоките и конструктивните сугестии во текот на изработката на овој докторски труд.

Благодарност упатувам и до сите професори кои со своето знаење, совети и поддршка придонесоа кон реализацијата на истражувањето.

Изразувам благодарност до господинот Мирослав Кукавичиќ за несебичната помош и поддршка.

Изразувам благодарност до моето семејство за нивната поддршка, разбирање и жртви, кои ми го овозможиле патот до овој важен момент, како и за постојаната помош во текот на целиот процес на изработка на овој докторски труд. Нивната трпеливост и охрабрување ми овозможиле да истраам и успешно да стигнам до оваа фаза од моето академско усовршување.

Посебна благодарност упатувам до мојот сопруг за континуираната поддршка и разбирање во периодот на интензивна работа и зголемен ангажман.

Овој докторски труд е посветен на мојата ќерка Неда, која со своето постоење претставува најголема инспирација, мотивација и сила.

Изјавувам дека докторскиот труд е оригинален труд што го имам изработено самостојно.

Своерачен потпис на докторандот
(на електронската верзија потпис и скратеницата с.р.)

(на електронската верзија на докторски труд)

Изјавувам дека електронската верзија на докторскиот труд е идентична со отпечатениот докторски труд.

Потпис на авторот, с.р

Листа на табели

Табела 1. Претпоставки за годишниот БДП користени во моделот за предвидување на сообраќај, Извор: [25]	8
Табела 2. Резултати од СВА за сценарио 4 - Надградба на трасата на трите главни делници, Извор: [25].....	9
Табела 3. Резултати од СВА за Сценарио 2, Сценарио 3 и Сценарио 3А, Извор: [25]	10
Табела 4. Стандардни вредности и дозволени отстапувања за ширината на колосекот според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74]).....	35
Табела 5. Дозволени отстапувања за надолжен профил – стабилност на шина според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74])	37
Табела 6. Дозволени максимални и минимални вредности за бочното надвишување според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74]).....	38
Табела 7. Дозволени максимални вредности за отстапување на смер/насока на колосек според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74]).....	39
Табела 8. Максимално дозволено витоперење според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74]).....	40
Табела 9. Ремонт на пругата Врбница – Бар во период од 2005 година до 2021 година (Извор: податоци од Železnicka Infrastruktura Crne Gore ad, ŽICG)	52
Табела 10. Геометриски карактеристики на пругата Врбница – Бар (Извор: податоци од Železnicka Infrastruktura Crne Gore ad, ŽICG)	52
Табела 11. Објекти по должина на пругата Врбница – Бар (Извор: податоци од Železnicka Infrastruktura Crne Gore ad, ŽICG)	53
Табела 12. Карактеристики на тип на шина S49 (Извор: податоци од Železnicka Infrastruktura Crne Gore ad, ŽICG)	53
Табела 13. Каталог на применети типови на прагови на пругата Врбница – Бар (Извор: податоци од ŽICG).....	54
Табела 14. Каталог на применети типови на систем за прицврстување (Извор: податоци од ŽICG)	54
Табела 15. Каталог на применети типови на засторна призма (Извор: податоци од ŽICG).....	55
Табела 16. Вредности за коефициентите Sv и Sm кои ги дефинира UIC според брзината на возовите (Извор: [97]).....	57
Табела 17. Усвоени вредности на корективните коефициенти за пресметка на дневното сообраќајно оптоварување според методологијата на UIC (Извор: [97]).....	57
Табела 18. Податоци за пресметка на сообраќајно оптоварување (Извор: Податоци добиени од Железнички превоз на Црна Гора)	58
Табела 19. Пресметани вредности на дневното сообраќајно оптоварување (Tf) за железничката линија Врбница – Бар во периодот 2014–2024 година (Извор: Сопствени пресметки)	59

Табела 20. Преглед на брзини на возење на пругата Врбница – Бар (Извор: [94])	61
Табела 21. Гранични вредности на параметрите за геометрија на колосек за евиденција на грешки од С категорија	73
Табела 22. Евидентирани грешки на пругата Врбница – Бар	74
Табела 23. Вредности за тежински коефициенти	87
Табела 24. Толкување на вредностите за глобалниот индекс на квалитет (TQI).....	89
Табела 25. Геометриски параметри на колосекот, нивно техничко значење и типолошка категоризација.	100
Табела 26. Инфраструктурни параметри на трасата, нивно техничко значење и тип на податок. .	101
Табела 27. Експлоатациони параметри на трасата, нивното инженерско значење и тип на податок.	101
Табела 28. Параметри поврзани со машинско одржување на колосекот, нивно значење и тип на податок.	101
Табела 29. Преглед на категориите и бројот на променливи вклучени во анализата.	103
Табела 30. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на линеарната регресија при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)	149
Табела 31. Клучни статистички показатели од OLS моделот за линеарниот модел за предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки).....	150
Табела 32. Резултати од регресионите коефициенти и статистичката значајност на параметрите во линеарниот OLS модел (Извор: сопствени пресметки).....	151
Табела 33. Вредности на стандардизирани коефициенти, статистичка значајност и насока на влијание на параметрите во линеарниот OLS модел (Извор: сопствени пресметки).....	152
Табела 34. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на полиномната регресија при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)	156
Табела 35. Клучни статистички показатели од OLS моделот за полиномниот модел за предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)	157
Табела 36. Резултати од регресионите коефициенти и статистичката значајност на параметрите во полиномниот OLS модел (Извор: сопствени пресметки).....	158
Табела 37. Вредности на стандардизирани коефициенти, статистичка значајност и насока на влијание на параметрите во полиномниот OLS модел (Извор: сопствени пресметки).....	159
Табела 38. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на Ridge регресија при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки).....	163
Табела 39. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на Random Forest при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)	167
Табела 40. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на Neural Network MLP Regression при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)	171

Табела 41. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на Support Vector Regression (SVR) при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)	176
Табела 42. Параметри од парцијална линеарна регресија за утврдување на промена во трендот на деградација на TQI пред и по 2019 година. (Извор: сопствени пресметки).....	185
Табела 43. Делници со идентификувани континуирани деградации во сите три анализирани временски периоди прикажани преку стационажа и пресметани стапки на деградација ΔTQI . (Извор: сопствени пресметки)	188
Табела 44. Споредба на системска и просторна анализа на деградацијата. (Извор: сопствени пресметки)	189
Табела 45. Значајни резултати од повеќекратна регресиска анализа за врската помеѓу бројот на интервенции и стапката на деградација. (Извор: Сопствени пресметки).....	192
Табела 46. Проценети вредности на долгорочна деградација на TQI во функција од бројот на машински интервенции (Извор: Сопствени пресметки врз основа на анализата на ΔTQI за периодот 2017 – 2024).	198
Табела 47. Статистички мерки за евалуација на моделите за предвидување. (Извор: Сопствени пресметки)	201

Листа на слики

Слика 1. Прогноза на товарниот сообраќај изразена во нето тони годишно, Извор: [25]	8
Слика 2. Прогноза на патнички сообраќај изразена во број на патници годишно, Извор: [25]	8
Слика 3. Проекција на должина на шини во кривина со странично абење >13mm, Извор: [25]	9
Слика 4. Сеопфатна SEETO мрежа. Извор: South East Europe Transport Information System (SEETIS) III	11
Слика 5. Приказ на SEETO железничка мрежа која е во состав на TEN – Т мрежата, Извор: Connectivity agenda (Co-financing of Investment Projects in the Western Balkans 2016)	11
Слика 6. Состојба на железничката мрежа во Западен Балкан (Извор: [26])	12
Слика 7. Моделирано претходно однесување на колосекот (Извор: [28])	14
Слика 8. Моделирано идно однесување со гранична вредност за минимално време помеѓу две последователни активности за подбивање на колосек: а) 6 месеци; б) 30 дена; в) 2 години (Извор: [28])	15
Слика 9. Предвидени наспроти набљудувани вредности за стапки за деградација на колосек (Извор: [30])	18
Слика 10. Споредба на вистинската и проценетата стапка на деградација на примероците од шест делници од колосек на железничка пруга според моделот на вештачка интелигенција (Извор: [30])	18
Слика 11. Составни елементи на железничката пруга прикажани во попречен пресек (сопствен извор)	27
Слика 12. Поделба на работите за одржување	29
Слика 13. Главни оски на координатниот систем на колосекот	33
Слика 14. Ширина на колосек во случај на нови, неизабени шини	35
Слика 15. Ширина на колосек во случај на избани шини	35
Слика 16. Надолжен профил (стабилност)	36
Слика 17. Бочно надвишување	37
Слика 18. Хоризонтална геометрија на шина и колосек	38
Слика 19. Витоперење на колосек	40
Слика 20. Графички приказ на измерени дефекти за ширина на колосек, надвишување и витоперење	41
Слика 21. Приказ на добра геометрија на колосек и репрезентативен дијаграм	42
Слика 22. Приказ на лоша геометрија на колосек и репрезентативен дијаграм	42
Слика 23. Влијанието на технологијата за снимање на одржувањето на ÖBB (Извор: [88])	42
Слика 24. Железничка мрежа на територијата на Црна Гора, Извор: Nacionalni program željezničke infrastrukture 2021-2023 [94]	48

Слика 25. Пруга Белград – Бар, Извор: Beograd – Bar (monografija), urednik: Dragoljub Golubović (Novinsko izdavačko poduzeće Duga, Beograd 1972.).....	50
Слика 26. Надолжен профил на пругата Белград – Бар, Извор: https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDeljezni%C4%8Dka_pruga_Beograd_%E2%80%93_Bar	51
Слика 27. Број на патнички возови пуштени во локален и меѓународен сообраќај (Извор: податоци од Željeznički prevoz Crne Gore).....	55
Слика 28. Остварен товарен сообраќај во нето тони (Извор: податоци од ŽICG).....	56
Слика 29. Пресметано дневно сообраќајно оптоварување за железничката пруга Врбница – Бар ..	60
Слика 30. Главни геоморфолошки и релјефни единици на територијата на Црна Гора со означена траса на железничката линија Врбница – Бар. Извор: [98]).....	62
Слика 31. Геолошка карта на Црна Гора (Извор: [98]).....	63
Слика 32. Дефект на измерениот параметар	69
Слика 33. Мерна кола ЕМ 80L, за мерење на параметри на геометрија на колосек (Извор: [73])...	70
Слика 34. Графички и нумерички извештај од мерење на геометријата на колосекот со мерна кола ЕМ 80L	71
Слика 35. Збиен извештај за оценка на состојбата на колосекот	72
Слика 36. Состојба на железничката пруга Врбница – Бар според измерените параметри за геометрија на колосек во 2017 година	74
Слика 37. Мерна кола ЕМ 120, сопственост на ТИНСА ООД Софија	75
Слика 38. Графички извештај од мерење на геометријата на колосекот со мерна кола ЕМ 120	76
Слика 39. Нумерички извештај од мерење на геометријата на колосекот со мерна кола ЕМ 120 ...	78
Слика 40. Мерна кола ЕМ 120 од типот Север, сопственост на Инфраструктура железнице Србије а.д.....	79
Слика 41. Графички извештај од мерење на геометријата на колосекот со мерна кола од типот Sever	80
Слика 42. Нумерички извештај за изолирани грешки на колосекот	81
Слика 43. Збиен (сумарен) извештај за грешки на колосекот	82
Слика 44. Структура на моделот за предвидување на TQI_2024	110
Слика 45. Визуелна шема на постапката на 5-fold cross-validation.	110
Слика 46. Преглед на фази во процесот на моделирање: подготовка на податоци, тренирање на модели и валидација	112
Слика 47. Шематски приказ на архитектурата на применетиот MLP модел за предвидување на TQI.	128
Слика 48. Визуелизација на важноста на променливите за моделот на TQI во 2017 година, добиена со Random Forest и LOOCV. (Извор: Сопствени пресметки)	144

Слика 49. Визуелизација на важноста на променливите за моделот на TQI во 2019 година, добиена со Random Forest и LOOCV. (Извор: сопствени пресметки)	145
Слика 50. Визуелизација на важноста на променливите за моделот на TQI во 2022 година, добиена со Random Forest и LOOCV. (Извор: сопствени пресметки)	146
Слика 51. Визуелизација на важноста на променливите за моделот на TQI во 2022 година, добиена со Random Forest и LOOCV. (Извор: сопствени пресметки)	147
Слика 52. Агрегирана важност на променливите врз индексот на квалитет на колосекот (TQI) за периодот 2017–2024, добиена со примена на LOOCV (Leave-One-Out Cross-Validation) и Random Forest модел. (Извор: сопствени пресметки)	148
Слика 53. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI ₂₀₂₄ добиени со примена на линеарна регресија. (Извор: сопствени пресметки).....	153
Слика 54. График на резидуали за линеарниот регресиски модел за TQI ₂₀₂₄ . (Извор: сопствени пресметки)	154
Слика 55. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI ₂₀₂₄ добиени со линеарна регресија. (Извор: сопствени пресметки)	155
Слика 56. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI ₂₀₂₄ добиени со примена на полиномна регресија. (Извор: сопствени пресметки)	160
Слика 57. График на резидуали за полиномен регресиски модел за TQI ₂₀₂₄ (Извор: сопствени пресметки)	161
Слика 58. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI ₂₀₂₄ добиени со полиномна регресија. (Извор: сопствени пресметки)	162
Слика 59. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI ₂₀₂₄ добиени со примена на Ridge регресија. (Извор: сопствени пресметки).....	164
Слика 60. График на резидуали за Ridge регресиски модел за TQI ₂₀₂₄ . (Извор: сопствени пресметки)	165
Слика 61. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI ₂₀₂₄ добиени со Ridge регресија. (Извор: сопствени пресметки)	166
Слика 62. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI ₂₀₂₄ добиени со примена на Random Forest. (Извор: сопствени пресметки).....	169
Слика 63. График на резидуали за Random Forest регресиски модел за TQI ₂₀₂₄ . (Извор: сопствени пресметки)	169
Слика 64. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI ₂₀₂₄ добиени со Random Forest. (Извор: сопствени пресметки)	170
Слика 65. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI ₂₀₂₄ добиени со примена на Neural Network MLP Regressor. (Извор: сопствени пресметки)	173
Слика 66. График на резидуали за MLP Regressor моделот за TQI ₂₀₂₄ . (Извор: сопствени пресметки)	173

Слика 67. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со MLP Regressor. (Извор: сопствени пресметки)	174
Слика 68. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со примена на SVR. (Извор: сопствени пресметки)	177
Слика 69. График на резидуали за SVR моделот за TQI_{2024} . (Извор: сопствени пресметки).....	178
Слика 70. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со SVR. (Извор: сопствени пресметки)	179
Слика 71. Стапка на деградација на делници по стационажа за периодот 2017–2019 година (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења на TQI за периодот 2017–2019)	181
Слика 72. Стапка на деградација на делници по стационажа за периодот 2019–2022 година (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења на TQI за периодот 2019–2022)	181
Слика 73. Стапка на деградација на делници по стационажа за периодот 2022–2024 година (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења на TQI за периодот 2022–2024)	182
Слика 74. Стапка на деградација по делници со највисока просечна деградација (топ 10%) за трите временски периоди (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења на TQI)	183
Слика 75. Стапка на деградација со прикажани локации на објекти и интервенции (мостови, тунели, станици, подбивање). (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења и евиденција за интервенции)	184
Слика 76. Системска анализа на деградации со прикажан просечен TQI по години и пресметана преломна точка (breakpoint) во 2019 година, со различен тренд пред и по неа. (Извор: Сопствени пресметки)	185
Слика 77. Просторна дистрибуција на континуирана деградација на колосекот по временски интервали. (Извор: Сопствени пресметки)	186
Слика 78. Делници со повторувачка континуирана деградација ($\Delta TQI > 0$) во сите три анализирани интервали. (Извор: Сопствени пресметки)	187
Слика 79. Матрица на корелација меѓу бројот на регулирање на колосекот и обликувања на засторот и стапката на деградација во трите временски интервали. (Извор: Сопствени пресметки)	190
Слика 80. Регресиони коефициенти со 95% доверливи интервали и тип на ефект, за интервенции во различни периоди и нивната врска со стапката на деградација. (Извор: Сопствени пресметки)	192
Слика 81. Среден краткорочен ефект на интервенциите врз ΔTQI . (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)	194
Слика 82. Среден долгорочен ефект на интервенциите врз ΔTQI . (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)	195
Слика 83. Краткорочен и долгорочен ефект на интервенции за периодот 2017–2019 година. (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)	196

Слика 84. Краткорочен и долгорочен ефект на интервенции за периодот 2019–2022 година. (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)	196
Слика 85. Краткорочен и долгорочен ефект на интервенции за периодот 2022–2024 година. (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)	197
Слика 86. Споредба на вредностите на коефициентот на детерминација (R^2) и средната квадратна грешка (RMSE) за сите модели на предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI). (Извор: Авторска обработка врз основа на резултатите од анализата.)	201
Слика 87. Споредба на емпириски и симулирани вредности на просечната стапка на деградација (δ) во функција од бројот на машински интервенции (n). (Извор: сопствени пресметки)	205

СОДРЖИНА

1. ВОВЕД	1
1.1. Дефинирање на проблемот.....	2
1.1.1. Анализирани делници од железнички пруги	3
1.2. Цели на истражувањето.....	4
1.3. Методологија на истражувањето.....	5
1.4. Очекувани резултати	6
1.5. Преглед на досегашни трудови и истражувања од областа на одржувањето на железниците.....	7
1.5.1. Преглед на национални истражувања – Студија за железничкиот Коридор 10 (PCM, 2009)	7
1.5.2. Состојба и одржување на железничката мрежа во Западен Балкан – SEETO/TEN-T (2016)	10
1.5.3. Интегриран систем за управување со состојбата на инфраструктурата (Condition-Based Maintenance – CBM пристап)	13
1.5.4. Моделирање на деградацијата во системот за управување со одржување на железничката инфраструктура (RMMS)	14
1.5.5. Преглед и класификација на модели за предвидување на деградацијата на колосекот	16
1.5.6. Примена на вештачки невронски мрежи за предвидување на деградацијата на колосекот	17
1.5.7. Модели за предвидување на дефекти во геометријата на колосекот.....	19
1.5.8. Модели за поддршка на одлучувањето во управувањето со железничката инфраструктура засновани на RAMS и LCC анализи	20
1.5.9. Модели и методи за интегрирано управување со железничката инфраструктура	21
1.5.10. Заклучоци од прегледот на претходните истражувања.....	22
1.6. Содржина на трудот.....	22
2. ЖЕЛЕЗНИЧКА ИНФРАСТРУКТУРА	26
2.1. Елементи на железничката пруга	26
2.2. Одржување на железничката инфраструктура.....	28
2.2.1. Поделба на работите за одржување на железничките пруги	29
2.2.2. Поделба на работите на одржување според обемот на работа	30
2.2.3. Поделба на работите на одржување според годишните времиња.....	31
2.2.4. Значење на правилното и навремено извршување на работите за одржување на железничката пруга.....	31
2.3. Проверка на геометриската состојба на колосекот.....	32

2.3.1.	Одржување на геометрија на колосек	33
2.3.2.	Начини за мерење на параметрите на геометријата на колосекот	41
2.4.	Управување со железничката инфраструктура	45
3.	ЖЕЛЕЗНИЦАТА ВО ЦРНА ГОРА	47
3.1.	Железничка пруга Врбница (Државна граница со Србија) – Бар	49
3.2.	Геометриски карактеристики на пругата	52
3.3.	Карактеристики на горниот строј на колосекот	53
3.4.	Сообраќајно оптоварување	55
3.4.1.	Сообраќајно оптоварување според UIC	56
3.5.	Брзина на движење на возовите на пругата Врбница – Бар	60
3.6.	Геоморфолошки и геолошки карактеристики на теренот	62
3.7.	Инженерско геолошки карактеристики	64
3.7.1.	Геолошки и хидрогеолошки карактеристики на подрачјето Колашин – Подгорица	65
3.8.	Работи за одржување на горниот строј на железничката пруга Врбница – Бар	66
4.	МЕРЕЊЕ НА ГЕОМЕТРИСКАТА СОСТОЈБА НА КОЛОСЕКОТ НА ПРУГАТА ВРБНИЦА – БАР 68	
4.1.	Работи за одржување на горниот строј на железничката пруга Врбница – Бар	69
4.2.	Мерења извршени во 2019 година со мерна кола EM 120 – Plasser & Theurer	75
4.3.	Мерења извршени во 2022 и 2024 година со мерна кола Sever 1435	78
4.3.1.	Метод на снимање и обработка на податоците	79
4.3.2.	Извештаи добиени од системот Sever 1435	80
4.4.	Поврзување на резултатите од мерењата со аналитичката обработка	83
5.	ОПИС НА ПОДАТОЦИТЕ ВКЛУЧЕНИ ВО АНАЛИЗАТА	84
5.1.	Поделба на трасата на хомогени делници – стандардизирана методологија	84
5.2.	Геометриски параметри на колосекот	86
5.3.	Индекс на квалитет на колосекот – TQI	86
5.4.	Инфраструктурни параметри	90
5.5.	Експлоатациони параметри	93
5.6.	Податоци за извршено машинско одржување на колосекот	94
6.	МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕ	97
6.1.	Истражувачка рамка и цели	98
6.2.	Тип на истражување	99
6.3.	Дефиниција и категоризација на променливи	99

6.3.1.	Геометриски параметри на колосекот.....	100
6.3.2.	Инфраструктурни параметри	100
6.3.3.	Експлоатациони параметри.....	101
6.3.4.	Параметри за машинско одржување	101
6.4.	Прибирање на податоци и нивна техничка обработка	102
6.5.	Подготовка на податоците	102
6.5.1.	Чистење и валидација на податоците.....	103
6.5.2.	Интеграција и структурирање на податоците	104
6.5.3.	Нормализирање на нумеричките параметри	104
6.6.	Проценка на важност на параметри (Feature Importance)	105
6.6.1.	Примена на Random Forest модел.....	105
6.6.2.	Leave One Out Cross Validation (LOOCV) – Вкрстена валидација	107
6.7.	Методологија за предвидување и валидација	108
6.7.1.	Цел и логика на предвидувањето	108
6.7.2.	Методологија за тренирање и тестирање.....	110
6.7.3.	Методолошки чекори.....	111
6.7.4.	Мерки за евалуација на моделите.....	115
6.7.5.	Софтверски алатки и програмска инфраструктура.....	117
6.7.6.	Причини за избраната поставеност	119
6.8.	Модели за предвидување и евалуација	120
6.8.1.	Линеарна регресија	120
6.8.2.	Полиномна регресија	122
6.8.3.	Ridge регресија	123
6.8.4.	Random Forest	125
6.8.5.	Support Vector Regression (SVR).....	126
6.8.6.	Neural Networks MLP Regressor – MLP – Регресор на Невронски Мрежи	127
6.9.	Анализа на стапка на деградација	129
6.10.	Анализа на умерена и континуирана деградација на геометријата на колосекот	130
6.10.1.	Со примена на Piecewise Linear Regression – Парцијална Линеарна Регресија	130
6.10.2.	Локализација на деградациите по стационажа.....	131
6.11.	Анализа на влијанието на фреквенцијата на подбивање врз деградацијата на колосекот	132
6.11.1.	Подготовка и категоризација на податоци	132

6.11.2.	Статистичка корелација – Pearson-ов коефициент на корелација	132
6.11.3.	Мултиваријантна регресија по тип и период на интервенции.....	133
6.12.	Оптимизација на бројот на машински интервенции	135
6.12.1.	Симулација со техника на решетка – пребарување на мрежа (Grid Search).....	135
6.12.2.	Интегрална анализа по интервали.....	138
6.12.3.	Дефинирање на оптимални точки	139
6.13.	Ограничувања на методологијата.....	140
6.13.1.	Ограничувања поврзани со достапноста и квалитетот на податоците	140
6.13.2.	Ограничувања на моделите за предвидување	141
6.13.3.	Ограничувања на регресионите анализи	141
6.13.4.	Ограничувања на интерпретација и примена.....	141
7.	РЕЗУЛТАТИ.....	143
7.1.	Проценка на важноста на параметрите (Feature Importance) со примена на Random Forest	143
7.1.1.	Влијание на поединечни фактори врз TQI во 2017 година	143
7.1.2.	Влијание на поединечни фактори врз TQI во 2019 година.....	145
7.1.3.	Влијание на поединечни фактори врз TQI во 2022 година.....	146
7.1.4.	Влијание на поединечни фактори врз TQI во 2024 година.....	146
7.1.5.	Агрегирана проценка на значењето на променливите за TQI (2017–2024) со Random Forest	147
7.2.	Линеарна регресија	149
7.2.1.	OLS анализа.....	150
7.2.2.	Визуелна анализа на резултатите	152
7.2.3.	Евалуација на резултатите од моделот	155
7.3.	Полиномна регресија.....	156
7.3.1.	OLS анализа.....	157
7.3.2.	Визуелна анализа на резултатите	159
7.3.3.	Евалуација на резултатите од моделот	162
7.4.	Ridge регресија	163
7.4.1.	Визуелна анализа на резултатите	164
7.4.2.	Евалуација на резултатите од моделот	166
7.5.	Random Forest модел.....	167
7.5.1.	Визуелна анализа на резултатите	168
7.5.2.	Евалуација на резултатите од моделот	171

7.6.	Невронска мрежа на MLP	171
7.6.1.	Визуелна анализа на резултатите	172
7.6.2.	Евалуација на резултатите од моделот	175
7.7.	Support Vector Regression (SVR).....	176
7.7.1.	Визуелна анализа на резултатите	177
7.7.2.	Евалуација на резултатите од моделот	179
7.8.	Пресметка и анализа на стапката на деградација.....	180
7.8.1.	Стапка на деградација за периодот 2017 – 2019	180
7.8.2.	Стапка на деградација за периодот 2019 – 2022	181
7.8.3.	Стапка на деградација за периодот 2022 – 2024	182
7.8.4.	Идентификација на делници со највисока просечна стапка на деградација во периодот 2017–2024.....	182
7.9.	Анализа на умерена и континуирана деградација на геометријата на колосекот	184
7.9.1.	Анализа на умерена и континуирана деградација со примена на парцијална линеарна регресија Piecewise Linear Regression.....	185
7.9.2.	Локализација на деградациите по стационажа.....	186
7.9.3.	Интерпретација на системски и просторни резултати	189
7.10.	Анализа на влијанието на фреквенцијата на регулирање на колосекот врз неговата деградација	189
7.10.1.	Регресиона анализа, влијание на бројот на активности за подбивање врз деградацијата на колосекот.....	191
7.11.	Оптимизација на бројот на интервенции.....	194
7.11.1.	Краткорочен ефект – просек по сите периоди	194
7.11.2.	Долгорочен ефект – просек по сите периоди	195
7.11.3.	Анализа на ефекти по временски интервали.....	196
7.11.4.	Анализа на ефектот од бројот на интервенции врз долгорочната стапка на деградација	198
8.	ДИСКУСИЈА ЗА ДОБЕИНТИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО	200
8.1.	Споредбена анализа на сите модели за предвидување.....	200
8.2.	Деградација на колосекот и ефект на машинските интервенции	201
8.3.	Оптимален број и фреквенција на машински интервенции.....	203
8.4.	Инженерска примена на моделите и стратегии за управување со одржувањето на колосекот	206
8.4.1.	Применливост на моделите во системи за предиктивно одржување.....	206
8.4.2.	Инженерски и економски аспекти на примена	206

8.4.3.	Препораки за инженерска имплементација.....	207
8.5.	Ограничувања и насоки за идни истражувања.....	207
8.5.1.	Методолошки ограничувања и ограничувања во достапноста и квалитетот на податоците	207
8.5.2.	Можности за проширување на моделите.....	208
8.5.3.	Интеграција на економските и аспектите од животниот циклус на инфраструктурата	208
9.	ЗАКЛУЧОК	209
	Користена литература.....	212
	ПРИЛОГ – ТАБЕЛА СО ПОДАТОЦИ	226

1. ВОВЕД

Растот на железничкиот сообраќај и брзината на возовите имаат значително влијание врз деградацијата на колосеците на пругите [1]. Ова наметнува потреба од методи и средства за идентификување на деградацијата на геометријата на железничкиот колосек и вградените материјали во него за да се оптимизира одржувањето [2, 3].

Одржувањето на железничката инфраструктура, покрај техничките познавања за однесувањето на колосекот под влијание на товари и потребните мерки за негова санација, е и економско прашање со значителни трошоци. Предвидување на деградацијата на геометријата на колосекот и неговите составни компоненти, како и организирање на потребните работи за одржување, бара одредено искуство и познавање на различни индикатори за квалитетот на состојбата на геометријата и материјалите вградени во горниот и долниот строј на пругата [4, 5]. Одлуката да се интервенира со потребните работи за одржување бара прецизно и квалитативно дефинирање на целите што треба да се постигнат. Овие цели се однесуваат на квантитетот и квалитетот на извршените работи и цената на извршеното одржување [6]. Од тие причини, е потребно да се дефинира процесот на одржување во согласност со однапред дефинирани цели и да се воспостават задоволителни индикатори кои ќе овозможат да се проверат очекуваните перформанси по извршувањето на работите за одржување.

Активностите за контрола и планирање на одржувањето претставуваат амбициозна и сложена задача. Тие вклучуваат неколку тесно поврзани аспекти како надгледување на состојбата на колосекот, планирање и примена на специјални машини и ангажирање на посебно обучена работна сила за активностите за одржување [7, 8]. Од овде произлегува потребата од анализа на барањата за одржување, за да можат да се планираат, распоредат и конечно да се спроведат активностите за одржување на најдобар можен начин, со користење на оптимални ресурси, со намалување на трошоците за одржување и со обезбедување на максимално користење на пругата без загрозување на безбедноста на сообраќајот и зголемување на транспортните трошоци [9].

Анализите на физичкото однесување на различните елементи на колосекот овозможуваат да се воспостават теоретски пристапи за димензионирањето на елементите во горниот строј на железничките пруги. Детерминистичката природа на овие анализи, заедно со дополнителен пробабилистички пристап, овозможува да се дефинираат параметри за избор на квалитет и димензии на различните елементи во колосекот за да се овозможи безбедно одвивање на работите на одржување со намалени трошоци [10].

Железничкиот колосек е натоварен со товари кои делуваат во три насоки: вертикална, странична (бочна) и надолжна. Како резултат на зголемените оптоварувања и брзините на движење на возовите, носивоста на засторот и планумот се намалува и доведува до појава на деформации. Геометриската состојба на трасата потоа се влошува што резултира со значително зголемени трошоци за одржување [11].

Мерењето на физичките карактеристики на составните елементи на трасата, особено на основните елементи во железничкиот колосек, е од суштинско значење за да се квантифицира учеството на овие елементи во одржувањето на колосекот. Различните методи за мерење и проценка на квалитетот на геометријата на колосекот постојано се развиваат, а главната цел е да се прилагодат методите што се лесни за употреба и овозможуваат мерните параметри да бидат поврзани со временски интервали и работа на одржување [12, 13].

Потребни се значителни инвестиции за одржување и обновување на железничките инфраструктурни мрежи. Просечните годишни трошоци за одржување и реконструкција по километар пруга за западноевропските железнички мрежи изнесуваат околу 50.000 € [14]. За да се одржи железничката инфраструктура во задоволителна состојба, од суштинско значење е правилно да се разбере механизмот со кој се менува состојбата на секој составен елемент од колосекот. Таканаречените „модел на влошување (деградирање)“ овозможуваат поврзување на идентификуваното однесување на колосекот во минатото, со цел предвидување на неговото идно однесување [15]. Вклучувањето на овие модели во соодветен, моќен, но флексибилен систем за управување и одржување на железнички пруги овозможува да се направат долгорочни симулации на однесувањето на сите елементи во колосекот, балансирајќи го ефективно постигнатиот квалитет со трошоците за работите на одржување и реконструкција (како и инспекции и други негативни последици како нарушувања на сообраќајот, достапност и сл.), што овозможува значителни заштеди [16]. Во денешни услови, рентабилна железничка инфраструктура може да се добие само со редовно следење на перформансите на геометријата на железничката инфраструктура и состојбата на составните компоненти на колосекот и користење на методи за предвидување, планирање и оптимизација, што е во склоп на главните цели на системот за управување и одржување на железниците.

Состојбата на геометријата и елементите од горниот строј на железничката инфраструктура е клучен фактор што влијае на безбедноста во сообраќајот, достапноста на инфраструктурата, вкупните трошоци за одржување и ремонт, како и приходите. Мерењето и анализата на состојбата на геометријата и елементите вградени во колосекот на железничката инфраструктура е единствениот правилен пристап со цел ефикасно да се следи нивното однесување и да се испланираат работите за одржување [17].

1.1. Дефинирање на проблемот

Комплексноста на железничкиот транспортен систем наметнува високи и често меѓусебно спротивставени барања пред управителите на железничката инфраструктура. Од една страна, постојано расте побарувачката за зголемување на капацитетот и обемот на сообраќај, со цел железницата да обезбеди поголеми приходи и подобра конкурентност. Од друга страна, се јавува уште поизразена потреба за рационализација и намалување на трошоците, особено во доменот на одржувањето и обновата на инфраструктурата [18, 19].

Овие спротивставени барања создаваат значителен притисок врз управителите на инфраструктурата, од кои се очекува да обезбедат висок степен на сигурност, достапност и квалитет на инфраструктурата, но во услови на ограничени буџети и сè поригорозни барања за ефикасност [19].

Голем дел од активностите за одржување на железницата се поврзани со одржувањето на геометријата на колосекот. Поради континуираните динамички сили што се пренесуваат од сообраќајот врз колосекот, со текот на времето доаѓа до постепена деградација на геометриските параметри, односно отстапувања од проектираната вертикална и хоризонтална геометрија. Кога геометријата се деградира под прифатливите граници, се зголемува ризикот од сериозни последици, како што е излегување на возот од шините. Затоа, активностите за одржување имаат клучна улога во контрола на деградацијата и обновувањето на геометријата на критичните делници [20].

Овозможување напредок во истражувањето на оптимизацијата на активностите за одржување и моделирањето на трошоците преку точна проценка на процесот на деградација

претставува голем научен и практичен предизвик [17, 19]. Голем дел од неизвесноста при железничките инвестиции произлегува токму од недоволното познавање и квантифицирање на процесот на деградација [12].

Првиот клучен предизвик се однесува на достапноста и квалитетот на податоците потребни за моделирање на геометриската деградација. Повеќе истражувачи истакнуваат дека ограничената достапност на податоци претставува една од главните пречки за развој на доверливи модели на деградација [21, 22, 23]. Недостатокот од конзистентни податоци го забавува напредокот во развојот на методи за прецизно предвидување на трошоците за одржување и планирање на интервенциите [17].

Во земјите од Западен Балкан, евиденцијата за изведените работи на одржување и реконструкција на железничката инфраструктура е ограничена или несистематска, што резултира со непотполна слика за состојбата и динамиката на деградација.

Ова истражување има за цел да ја надмине оваа празнина преку користење на реални и веродостојни податоци добиени од релевантни институции во Црна Гора, кои ги опфаќаат: мерењата на геометријата на колосекот, сообраќајните параметри, податоците за природните влијанија и базата за активности на одржување на колосекот. Истражувањето е спроведено на делницата Бар – Врбица, која е репрезентативна поради неодамнешните активности за надградба и одржување.

Вториот предизвик произлегува од комплексната структура на железничката инфраструктура, која опфаќа различни типови објекти (свртници, мостови, тунели, станици и отворени делници). При статистичка анализа на параметрите на деградација, потребно е да се земе предвид влијанието на сите овие елементи, бидејќи секој тип на објект има различна динамика на деградација [24, 14].

Третиот предизвик се однесува на варијабилноста на однесувањето на колосекот по должината на трасата. Дури и соседните делници можат да покажат значително различна стапка на деградација, поради разлики во геометријата, материјалите, староста, геотехничките услови на подлогата и експлоатационите услови [23].

Затоа, пред секоја анализа е неопходно да се дефинираат хомогени делници – сегменти на трасата со идентични карактеристики на хоризонталната и вертикалната геометрија, тип и старост на елементите на горниот строј, геомеханички услови и климатски влијанија.

На крај, еден од најголемите практични предизвици е усогласувањето на планираните активности за одржување со ограничените финансиски средства. Според законот за железници, средствата за реконструкција, ремонт и одржување на инфраструктурата се обезбедуваат од државниот буџет, амортизација и кредити. Поради хроничен недостиг на финансиски средства, во пракса често се изведуваат само итни и неопходни активности, додека ремонтите и реконструкциите се одложуваат за периоди со поповолна финансиска состојба.

Од овие причини се создава реална потреба од развој на систем за управување со одржувањето врз основа на перформансите на инфраструктурата, односно врз реално измерени параметри кои ја опишуваат нејзината состојба и функционално однесување.

1.1.1. Анализирани делници од железнички пруги

Основниот проблем кој се разгледува во ова истражување се однесува на анализа на состојбата на колосекот на железничката инфраструктура на територијата на Република Црна Гора, со посебен акцент врз процесот на геометриска деградација и идентификација

на параметрите што влијаат врз нејзиното појавување. Целта е да се испитаат и квантифицираат факторите што придонесуваат за влошување на состојбата на колосекот, да се разјаснат причините за деградација, како и да се развијат методи за мерење и анализа на физичките параметри релевантни за проектирање, следење и одржување на геометријата на трасата.

За подобро разбирање на проблематиката, во ова поглавје најнапред е даден опис на разгледуваната железничка мрежа, со дефинирање и прикажување на основните технички карактеристики на предметните делници. Понатаму, се објаснети составните елементи на железничката инфраструктура, со посебно внимание на начинот на мерење на геометријата на колосекот и обработка на податоците од извршените мерења. На тој начин се обезбедува реална и сеопфатна слика за тековната состојба на колосекот, која претставува основа за понатамошните анализа спроведени во рамки на дисертацијата.

Состојбата на инфраструктурата и параметрите добиени од мерењата на геометријата на колосекот претставуваат основни и најзначајни влезни податоци за анализа на деградацијата, која е суштинска цел на ова истражување.

Предмет на истражување е делницата на железничката пруга Бар – Бијело Поље (граница со Република Србија), која претставува дел од меѓународната пруга Белград – Бар, означена во рамките на мрежата на SEETO (South-East Europe Transport Observatory) како Рута 4. Пругата има вкупна должина од 169,21 km и е електрифицирана по целата должина.

Во анализата се опфатени следните главни параметри кои влијаат на процесот на геометриско деградирање на колосекот:

- Теренска конфигурација, односно топографија и хидрографија,
- Сообраќајно оптоварување и категорија на сообраќај,
- Геометриските карактеристики на трасата,
- Тип и квалитет на вградените составни компоненти во колосекот
- Фази и превземени мерки на претходно одржување,
- Старост на инфраструктурните компоненти.

Прецизното опфаќање на карактеристиките на делницата, условите на експлоатација и достапните податоци овозможува поставување на јасни истражувачки цели насочени кон квантитативно оценување на процесот на деградација и развој на модел за предвидување на идната состојба на колосекот.

1.2. Цели на истражувањето

Со истражувањето е предвидено реализирање на следните цели:

- Истражувањето има за цел подобро да се разберат причините за деградација на колосекот, да се квантифицира влијанието на различните параметри врз оштетувањето на колосекот и да се развијат методи за мерење на физичките параметри корисни за проектирање на трасата на пругата и одржување на колосекот,
- Анализи на светските искуства и праксата кај нас со мерење на параметрите преку кои се идентификуваат дефектите на колосекот.
- Креирање на модели за геометриска деградација на колосекот, како и дефинирање на стратегија за одржување на пругата со дефинирање на интервал на инспекција и вид на одржување, имајќи ги предвид границите на безбедност за интервенции со одржувањето.

- Оптимизација на трошоците за одржување во контекст на оперативните трошоци на транспортот.

Овој истражувачки проект е предвидено да трае три до четири години. За исполнување на горенаведените цели, формулирани се следните истражувачки прашања:

- Како да се развие интегриран модел на деградација на геометријата на трасата со разгледување на различни деградации по должината на пругата?
- Како да се користат податоците за геометријата на трасата за да се идентификува исплатливиот интервал на инспекција и вид на одржување, имајќи ги предвид границите на безбедноста и одржувањето, користејќи симулациска оптимизација?

1.3. Методологија на истражувањето

Методологијата на истражувањето е заснована на систематски и квантитативен пристап кој овозможува сеопфатна анализа на состојбата и деградацијата на колосекот. Истражувањето се спроведува низ повеќе последователни чекори, кои овозможуваат интеграција на теренските податоци, статистичката обработка и модели за симулации.

Основните чекори на истражувањето се:

1. Прибирање податоци од постојните бази на релевантни институции и од теренските мерења,
2. Обработка, филтрирање и систематизација на прибраните податоци со примена на статистички методи и теоријата на веројатност,
3. Поделба на трасата на пругата на хомогени делници за дефинирање на репрезентативен статистички примерок,
4. Спроведување на анализи со примена на методи од областа на вештачката интелигенција и машинското учење, со вкрстување и поврзување на податоците од мерења, активности за одржување и карактеристики на инфраструктурните компоненти,
5. Развој на статистички, економетриски и модели базирани на машинско учење за предвидување на геометриската деградација на колосекот,
6. Симулација и споредба на сценарија со различна фреквенција на активности за одржување,
7. Дефинирање на краткорочни и долгорочни стратегии за одржување,
8. Оптимизација на активностите за одржување врз основа на моделските резултати, и
9. Проценка на ефикасноста на мерките за одржување со користење на историски и нови податоци од мерењата.

Реализацијата на оваа докторска дисертација се заснова на примената на општоприфатена научна методологија, структурирана во следните целини:

1. Општ преглед на истражувањето – идентификување на истражувачкиот проблем и преглед на релевантната литература со цел согледување на светските искуства во областа.
2. Дефинирање на проблемот – формулирање на предметот на истражувањето и можните приоди за негово решавање.
3. Дефинирање на целите на истражувањето – прецизирање на главната цел и поединечните задачи на истражувањето.
4. Одредување на предметните делници – дефинирање на делниците на пругите што ќе бидат опфатени со истражувањето.

5. Собирање и анализа на податоци – обработка на квантитативните и квалитативните параметри потребни за анализа.
6. Креирање и тестирање на модели за деградација на колосекот – развој, валидација и проценка на статистички, економетриски и машински модели за предвидување на деградацијата.
7. Развивање на нов приод во системот за одржување на колосекот – интегрирање на резултатите од моделите во стратегијата за управување со инфраструктурата.
8. Дискусија и заклучоци – синтеза на резултатите и формулирање на инженерски препораки.

Со примената на ваков методолошки пристап се овозможува развој на систем за анализа заснован на податоци, моделирање и оптимизација на состојбата на железничката инфраструктура. Очекуваните резултати од спроведените анализи треба да дадат квантитативна проценка на влијанието на поединечните фактори врз геометриската деградација на колосекот, да обезбедат предвидливост на неговата идна состојба и да придонесат кон формулирање на технички оправдани препораки за поефикасно управување со одржувањето.

1.4. Очекувани резултати

Од направените анализи во оваа докторска дисертација се очекува да се добијат резултати со кои се отсликува реалната состојба на железничката инфраструктура на територијата на Република Црна Гора, со посебен акцент на делниците со изразена геометриска деградација на колосекот.

Со истражувањето се овозможува целосен преглед на современите техники за мерење на геометријата на колосекот што се применуваат во Европа и во регионот, како и споредбена анализа со системот на мерења и обработка на податоци што се користи на разгледуваните пруги. На тој начин се создаваат услови да се воспостави врска помеѓу современите методи за мониторинг на инфраструктурата и условите, техниките можности и практиките што се применуваат во железничката мрежа на Црна Гора, како предмет на детална анализа во рамки на ова истражување.

Посебен придонес има во делот за анализа и проценка на степенот на влијание на различните параметри врз процесот на геометриска деградација, како и во развојот и тестирањето на статистички и машински модели за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI). Преку овие модели се овозможува подобро разбирање на динамиката на деградацијата и предвидување на идната состојба на колосекот под различни сценарија на одржување.

Добиените резултати и предложените решенија имаат двојна примена:

- во научноистражувачката област, преку развој на модели засновани на податоци и аналитички пристапи применливи и за други железнички системи, и
- во професионалната практика, преку создавање алатка за поддршка при донесување одлуки во процесот на планирање, одржување и ремонт на пругите.

Резултатите треба да придонесат кон воспоставување на поефикасен и економски оправдан систем за управување со одржувањето на железничката инфраструктура и да создадат основа за понатамошно унапредување на методите за предиктивно и управување базирано на индикатори со железниците на територијата на Република Северна Македонија и Црна Гора.

1.5. Преглед на досегашни трудови и истражувања од областа на одржувањето на железниците

Овој преглед ја поставува аналитичката и методолошката рамка за истражувањата поврзани со одржувањето на железничката инфраструктура, со фокус на геометриската стабилност на колосекот и планирањето на активности за одржување според неговата состојба. Опфатени се национални и регионални извештаи (Република Северна Македонија и Западен Балкан), европски практики и научни трудови што обработуваат одржување засновано на состојбата (condition-based maintenance CBM), системи за управување со одржување (Railway Maintenance Management Systems - RMMS), модели на деградација (детерминистички, пробабилистички, стохастички, механичко-емпириски) и современи пристапи од машинско учење. Посебно внимание е посветено на индикаторите за квалитет на колосекот (Track Quality Index - TQI), врската меѓу мерните серии и интервенциите, како и на економската оправданост преку концептите Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), кои ја опфаќаат сигурноста, достапноста, одржливоста и безбедноста на железничката инфраструктура, како и Life Cycle Cost (LCC), кој ги разгледува вкупните трошоци во текот на целиот животен циклус на инфраструктурниот систем. Целта е да се истакнат применливите модели и недоволно истражените области во литературата, кои го отвораат просторот за предложената методологија во оваа дисертација: интегрирано моделирање на деградацијата со повеќегодишни податоци (2017–2024) и комбинирање на статистички и модели за машинско учење за предвидување на индексот на квалитет на колосекот и оптимизација на бројот на интервенции.

1.5.1. Преглед на национални истражувања – Студија за железничкиот Коридор 10 (PCM, 2009)

Во областа на одржувањето на железничката инфраструктура во Република Северна Македонија, досега е реализирано само едно истражување со сличен предмет на анализа. Станува збор за „Студија за обновување на железничкиот Коридор 10 на територијата на Република Македонија – Техничка подготовка и економска проценка“, изработена од проф. д-р Зоран Кракутовски во 2009 година [25].

Железничкиот Коридор 10, кој претставува дел од паневропската транспортна мрежа на релација Солун – Скопје – Ниш – Белград – Загреб – Салцбург, има исклучително значење за националниот транспортен систем, со оглед на тоа што повеќе од 90% од надворешната трговија на државата се одвива преку него. Линијата што поминува низ територијата на Република Северна Македонија се протега на релацијата Табановце – Скопје – Велес – Градско – Демир Капија – Гевгелија – Богородица и е проектирана за мешовит (патнички и товарен) сообраќај.

Во рамки на студијата е извршена детална анализа на горниот строј на пругата, при што се наведува дека 93% од трасата е изградена со шини од тип S49, додека 2.7% користи тип UIC54. Пругата е изведена со заварени долги шински ленти (ДШЛ), но не постојат целосни податоци за староста на шините. Според достапните информации, 89% од праговите се дрвени, а најзастапен систем за прицврстување е К-системот. За засторната призма постои база на податоци за број на подбивања и количина на дополнителен материјал, што овозможува анализа на фреквенцијата на интервенции во различни години.

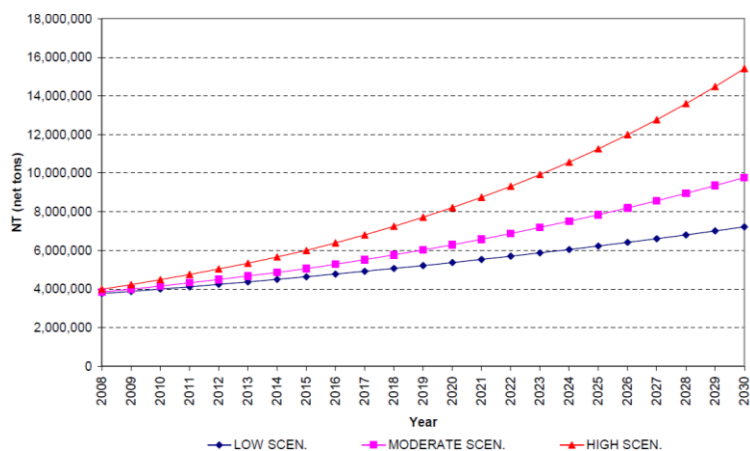
Во наведената студија е спроведена анализа на геометриските деградации на трасата во период од девет години (1991–2000), каде е забележано дека по 1993 година доаѓа до нагло намалување на бројот и должината на подбивањата. Во однос на трошоците за

одржување, евидентирано е дека редовното одржување на Коридор 10 опфаќа околу 53% од вкупните трошоци за редовно одржување на железничката мрежа, додека ремонтите и обновите на овој коридор претставуваат над 95% од трошоците за реконструкција на целата железничка мрежа.

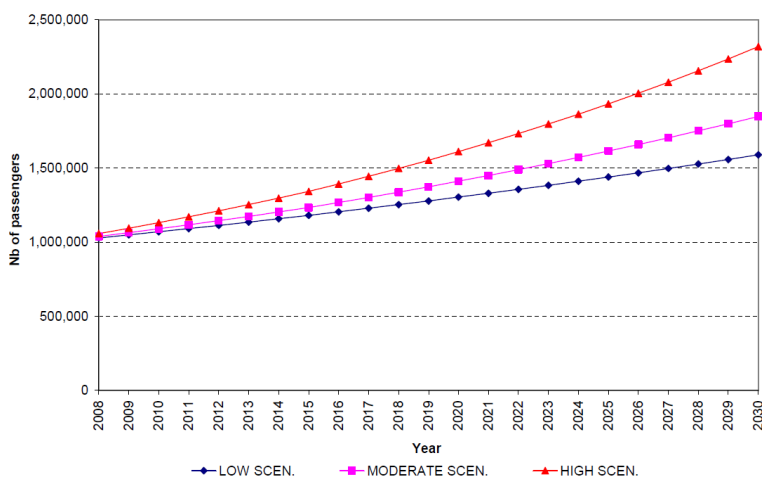
Просечната тежина на товарните возови без локомотива, во периодот 2002–2006 година, изнесува 788 тони, а најоптоварена делница е Табановце – Скопје, со просек од 23,6 товарни и 16,1 патнички возови дневно (2006). Податоците за искористеност на капацитетот во 2007 година покажуваат дека оваа делница функционираше со околу 90% од вкупниот капацитет.

Табела 1. Претпоставки за годишниот БДП користени во моделот за предвидување на сообраќај, Извор: [25]

	БДП (2007-2015)	БДП (2015-2030)
Високо сценарио	6%	6.5%
Средно сценарио	4%	4.5%
Ниско сценарио	3%	3%



Слика 1. Прогноза на товарниот сообраќај изразена во нето тони годишно, Извор: [25]

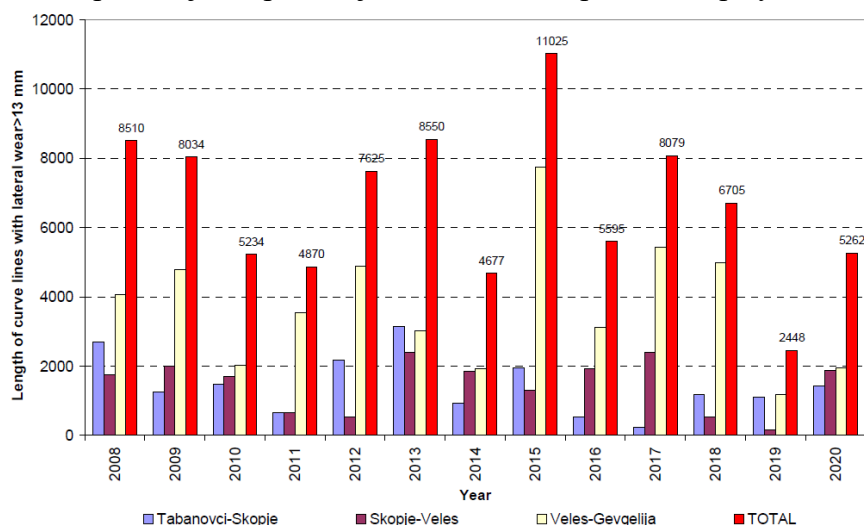


Слика 2. Прогноза на патнички сообраќај изразена во број на патници годишно, Извор: [25]

Исто така, во студијата е направена и сообраќајна прогноза базирана на моделот на REBIS (2003), кој ги зема предвид постојните обеми на сообраќај и предвидува раст во три

сценарија: високо (6%), средно (4%) и ниско (3%). За секое сценарио е извршена проценка на растот на БДП и на очекуваниот товарен и патнички сообраќај до 2030 година.

Дополнително, е направено предвидување на страничното абеење на шините, каде моделот ја пресметува должината на делниците со странично абеење поголемо од 13 mm – граница при која е неопходна замена на шините. Овој праг е користен за дефинирање на интервалите на интервенција и проекција на идните потреби за одржување.



Слика 3. Проекција на должина на шини во кривина со странично абеење >13mm, Извор: [25]

На крајот од студијата е изработена економска анализа на трошоци и користи (Cost–Benefit Analysis) за пет сценарија на одржување и модернизација:

- Сценарио 1: продолжување со постојните практики (референтно сценарио),
- Сценарио 2: минимално одржување (само итни поправки),
- Сценарио 3: целосна рехабилитација,
- Сценарио 3А: комбинирано сценарио (рехабилитација и замена на шини во кривини),
- Сценарио 4: надградба на пругата за брзини до 120 km/h.

Економската проценка е направена врз основа на пресметка на внатрешна стапка на рентабилност (IRR) и нето сегашна вредност (NPV) за секое сценарио. Резултатите покажуваат дека само сценариото 3А дава позитивни вредности на IRR и NPV за сите три варијанти на прогнозираниот сообраќај, што го прави економски најисплатливо решение. Сценаријата 2 и 3 имаат негативни NPV и не ги исполнуваат критериумите за финансиска оправданост.

Табела 2. Резултати од СВА за сценарио 4 - Надградба на трасата на трите главни делници, Извор: [25]

Сценарио	Табановци - Скопје		Скопје - Велес		Велес - Гевгелија	
	IRR	NPV (€)	IRR	NPV (€)	IRR	NPV (€)
Високо	5.46%	- 8 146 672	0.11%	- 65 503 808	0.25%	- 106 532 445
Средно	3.44%	- 10 987 839	/	- 67 957 517	/	- 112 938 358
Ниско	2.34%	- 12 363 409	/	- 69 194 848	/	- 115 994 988

Табела 3. Резултати од СВА за Сценарио 2, Сценарио 3 и Сценарио 3А, Извор: [25]

Сценарио	Сценарио 2		Сценарио 3		Сценарио 3А	
	IRR	NPV (€)	IRR	NPV (€)	IRR	NPV (€)
Високо	/	- 2 346 745	12.34%	4 255 695	19.66%	13 121 184
Средно	/	- 5 497 066	7.57%	- 3 810 457	14.38%	5 055 032
Ниско	/	- 7 025 132	4.52%	- 7 739 749	11.10%	1 125 740

Заклучокот од ова истражување е дека постојат економски и технички основи за инвестиции во рехабилитација и замена на шините во кривините (сценарио 3А), додека останатите пристапи не обезбедуваат поволна рентабилност.

Иако оваа студија претставува значаен придонес во анализата на железничката инфраструктура, може да се заклучи дека во Република Северна Македонија не се спроведени систематски и сеопфатни истражувања кои директно го разгледуваат прашањето на долгорочно одржување и моделирање на деградацијата на колосекот. Овој недостаток претставува вистински предизвик и мотивација на ова истражување, преку интеграција на достапните податоци, имплементација на европските стандарди и современи аналитички методи, да се предложи нов модел за предвидување на деградацијата и оптимизација на активностите за одржување на колосекот и неговите составни елементи.

1.5.2. Состојба и одржување на железничката мрежа во Западен Балкан – SEETO/TEN-T (2016)

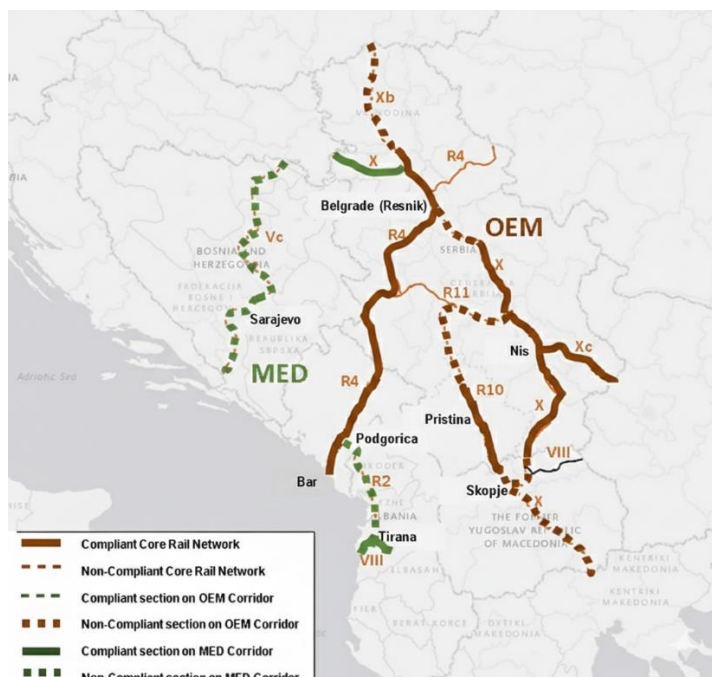
Особено релевантни податоци за регионот се содржани во извештајот на SEETO (South-East Europe Transport Observatory): „Извештај за одржување на железницата на основната мрежа на TEN-T во Западен Балкан“ [26]. Анализата ја опфаќа железничката мрежа на Албанија, Босна и Херцеговина, Северна Македонија, Косово, Црна Гора и Србија, во рамки на проектот TA to Connectivity in the Western Balkans чија главна цел беше да се направи проценка на институционалната и буџетската рамка за одржување на патиштата и железниците, да се предложат решенија за најдобри практики во однос на ситуацијата во Западен Балкан и да се изготви план за тригодишно одржување и индикативно проширување на патните и железничките мрежи.

Сеопфатната мрежа на SEETO, дефинирана со Меморандумот за разбирање, претставува заеднички договорена главна и помошна транспортна инфраструктура во Југоисточна Европа, како основа за планирање инвестиции. Мрежата опфаќа 6.554 km патишта, 4.807 km железници и 17 аеродроми (Слика 4). Концептот е насочен кон развој на поефикасни и поеколошки видови транспорт, подобрување на поврзаноста со TEN-T и усогласување на транспортните политики во регионот.

Главните железнички врски во регионот на Југо – Источна Европа, како и со мрежата TEN-T ја формираат сеопфатната железничка мрежа SEETO во вкупна должина од 4.807 km, од кои 58% од пругите се електрифицирани и 12% се двоколосечни. Во поделба на железничката мрежа по регионални учесници констатирано е дека повеќе од 60% од железничката мрежата е поставена во Хрватска и Србија, додека Црна Гора и Косово имаат најмал дел.



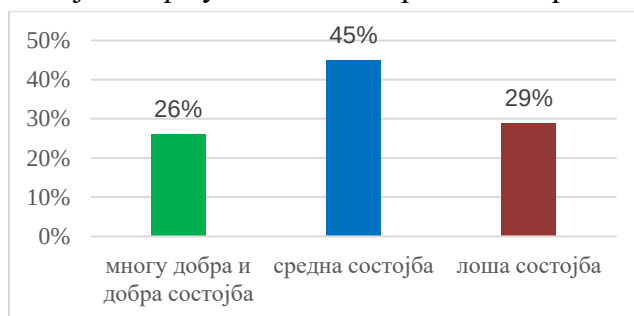
Слика 4. Сеопфатна SEETO мрежа. Извор: South East Europe Transport Information System (SEETIS) III



Слика 5. Приказ на SEETO железничка мрежа која е во состав на TEN – Т мрежата, Извор: Connectivity agenda (Co-financing of Investment Projects in the Western Balkans 2016)

Анализирани се три главни теми во врска со одржувањето на железницата: тековната законодавна и стратешка рамка, распределба на буџетот и потребите за одржување како и нивното влијание врз моменталната состојба на мрежата. Овој извештај ја сумираше, на сеопфатен начин, моменталната ситуација во Западен Балкан, при што се донесени следните заклучоци: Што се однесува до состојбата, 26% од железничката основна мрежа е

пријавено дека е во многу добра и добра состојба, каде што приближно 70%-100% од проектираната брзина може да се постигне. Најголемиот дел од Основната мрежа е во средна состојба (1.082 km), со поголеми варијации во максималната дозволена брзина. На овие делови може да се постигне приближно 42%-88% од проектираната брзина. Се констатира 29% од делниците се во лоша состојба, каде што во просек може да се постигне 55% од проектираната брзина (слика 6). Големи варијации во брзината и состојбата постојат на мали делови, што влијае на сигурноста, брзината и точноста на железничките претпријатија. Потребно е посистематско национално и регионално планирање на проектите за рехабилитација и одржување за да се реши ова прашање.



Слика 6. Состојба на железничката мрежа во Западен Балкан (Извор: [26])

Исто така, утвредно е дека рутинските трошоци за одржување не се совпаѓаат со потребите за одржување кои се проценети од железничките компании. Кога ќе се спореди 2015 со 2011 година, буџетот наменет за одржување се намалил кај повеќето регионални учесници (освен Косово). Што се однесува до инвестициските проекти за одржување и рехабилитација, Србија има најголеми инвестиции во рехабилитација на својата мрежа, а потоа следат Црна Гора и Република Северна Македонија, но поради претходниот период на недоволно инвестирање во железницата, како и заостанатиот дел од одржувањето, овие проекти за рехабилитација во многу случаи не се доволни и потребни се дополнителни средства за модернизација и реконструкција.

Од достапните документи, заклучено е дека, за најголемиот дел од земјите од Западен Балкан, не постои речиси никаков вид на евиденција за изведените работите за одржување и обновување на железничките инфраструктурни елементи во текот на неколку децении, а во најдобар случај, присутен е несистематски пристап за одржување и обновување. Поради оваа причина, не треба да изненадува што мрежите на регионалните учесници се во многу лоша состојба, каде што според „Извештај за одржување на железницата на основната мрежа на TEN-T во Западен Балкан“ 18,8% од мрежата во Западен Балкан имаат потреба од одржување/рехабилитација [26].

Сумирано, извештајот на SEETO претставува прв регионален документ кој систематски ја разгледува состојбата и предизвиците на железничкото одржување во земјите од Западен Балкан. Иако извештајот дава важен преглед на институционалните и буџетските рамки, во него недостасува детална анализа на геометриската состојба на колосекот, како и квантитативен пристап за моделирање на деградацијата и проценка на ефектите од интервенциите. Овој недостаток создава простор за продлабочени инженерски истражувања кои, преку систематска обработка на реални податоци и примена на аналитички и предиктивни модели, ќе овозможат прецизна проценка на стабилноста и оптимизација на активностите за одржување на железничката инфраструктура.

1.5.3. Интегриран систем за управување со состојбата на инфраструктурата (Condition-Based Maintenance – CBM пристап)

Во рамките на истражувањата реализирани во регионот, особено значаен е трудот „Мерење и анализа на состојбата на железничката инфраструктура како основа за управување со одржувањето“, објавен во списанието Građevinar [27]. Овој труд ги разгледува современите принципи на мерење, обработка и анализа на податоци за состојбата на железничката инфраструктура, при што фокусот е ставен на поврзувањето на техничките мерења со процесите на донесување одлуки за одржување и ремонт. Истражувањето претставува една од првите систематски студии во регионот што ја поврзува мерната геометрија на колосекот и стратегиите за управување со инфраструктурата, усогласени со европските стандарди и современите концепти за управување со животниот циклус на инфраструктурата (Life-Cycle Management).

Главен придонес на трудот е разработката на „condition-based maintenance“ (CBM) пристапот, кој се темели на реално измерени параметри на инфраструктурата наместо на фиксен временски циклус или број на возови. Авторите ја прикажуваат логичката структура на „condition-based“ синџирот на одржување, кој опфаќа седум поврзани фази:

- 1) Мониторинг и мерење – континуирано следење на состојбата на инфраструктурните елементи (колосек, застор, прагови, објекти) преку специјализирани мерни системи и возила.
- 2) Анализа – обработка и верификација на измерените податоци, идентификација на отстапувања и детекција на дефекти преку статистички и графички методи.
- 3) Генерирање на индикатори и предупредувања – трансформација на податоците во технички индикатори, како што се Track Quality Index (TQI), односно параметри за геометриска стабилност, со цел дефинирање на критични прагови.
- 4) Планирање – дефинирање на приоритети за интервенција според состојбата на инфраструктурата, со користење на оптимизациски критериуми (безбедност, достапност, трошоци).
- 5) Оптимизација – селекција на најсоодветна комбинација на активности (ремонт, реконструкција, превентивно одржување) за минимален трошок и максимален ефект.
- 6) Распоредување и изведба на активности – практична реализација на одобрените мерки за одржување на терен, во согласност со приоритетите и достапните ресурси.
- 7) Контрола и верификација – повторно мерење и оценување на резултатите по интервенцијата со цел да се утврди ефективноста и потребата од дополнителни активности.

Преку оваа структурна поставеност, авторите предлагаат интегриран модел за управување со одржувањето, кој ја заменува класичната, корективна логика (repair-based) со превентивна и предвидувачка, каде што секоја интервенција се темели на тековната состојба на колосекот. Во трудот се нагласува дека ваквиот пристап овозможува намалување на непланираните застои на пругата, подобро искористување на буџетите за одржување и зголемување на експлоатациониот век на колосекот.

Покрај концептуалниот дел, истражувањето опфаќа и опис на конкретни методи и технологии за мерење на геометриската состојба на колосекот и инфраструктурните

компоненти. Посебно внимание е посветено на примената на ласерски, инерцијални и GPS системи интегрирани во мерни коли, како и на обработката на сигналите и филтрирањето на податоците за добивање репрезентативни вредности на параметрите на геометријата (надолжен и попречен профил, витоперење, бочно надвишување и ширина на колосекот).

Во делот за анализа на податоците се опишани статистичките методи за детекција на трендови на деградација, како и постапките за дефинирање на критични гранични вредности на параметрите кои иницираат активности за одржување. Со ова се поставува основата за рационално управување со ризикот и оптимално планирање на интервенциите, во согласност со инженерските критериуми и расположливите ресурси.

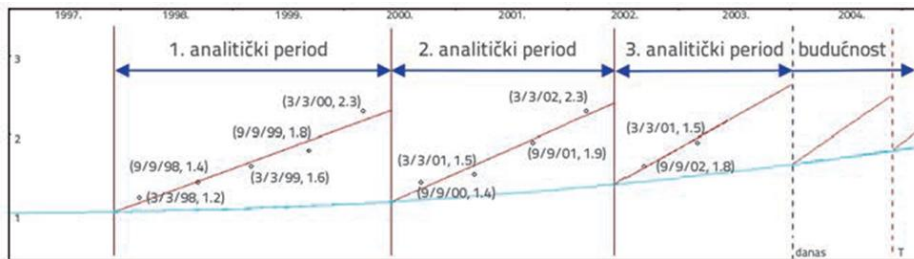
Во заклучокот на трудот, авторите истакнуваат дека примената на „condition-based“ системот бара развој на централизиран бази на податоци, интегрирани со системи за мерење и анализа, како и иновативни алгоритми за одлучување. Ваквиот систем би овозможил автоматизирано планирање и приоритизација на работите за одржување врз основа на реални индикатори за состојбата на инфраструктурата.

Главната поента на истражувањето е дека превентивниот пристап, заснован на податоци (data-driven) треба да ја замени сегашната практика на циклично и корективно одржување, со што се воспоставува нов модел на управување со железничката инфраструктура кој е попрецизен, поекономичен и технички одржлив [27].

1.5.4. Моделирање на деградацијата во системот за управување со одржување на железничката инфраструктура (RMMS)

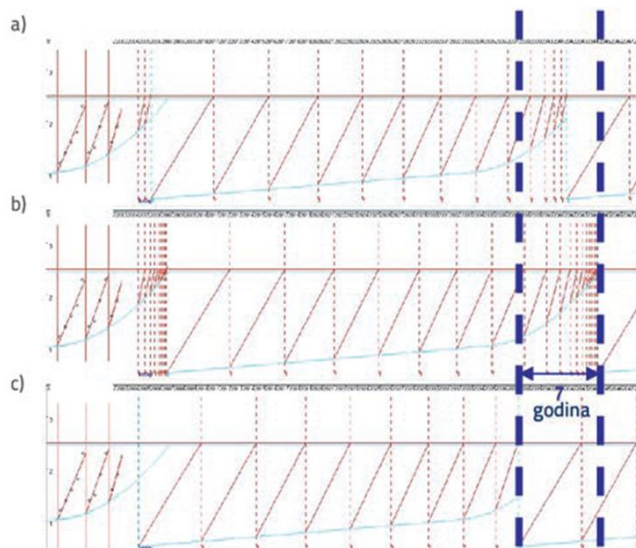
Дополнителен придонес кон оваа област претставува трудот на истиот автор, „Анализа на деградација на колосекот во рамките на системот за управување со одржување на железничката инфраструктура“, објавен во списанието Građevinar [28]. Во овој труд е разработена е оптималната структура на системот за управување со одржување на железници (RMMS – Railway Maintenance Management System), со посебен акцент на примената на моделот на деградација како суштински дел на системот за предиктивно управување со активностите на одржување.

Моделот се базира на линеарна функција на деградација $D(t)$, со која се моделира опаѓањето на квалитетот на колосекот во зависност од времето и изведените интервенции. За потребите на истражувањето се користени податоци од италијанските железници (RFI) за делницата Рим–Неапол, прва категорија, со мерења на хоризонталната геометрија на колосекот (стандардно отстапување) во сегменти од 200 m, регистрирани во периодот 1997–2004 г. Мерењата се комбинирани со податоци за извршени активности на подбивање на колосекот, што овозможило реконструкција на „минатото однесување“ на колосекот преку функција на деградација, како што е прикажано на слика 7.



Слика 7. Моделирано претходно однесување на колосекот (Извор: [28])

Со примена на моделот на деградација за да се добие идно предвидено однесување, добиена е ситуација како на Слика 8, врз основа на што се дефинирани стратегии за идни активности за одржување.



Слика 8. Моделирано идно однесување со гранична вредност за минимално време помеѓу две последователни активности за подбивање на колосек: а) 6 месеци; б) 30 дена; в) 2 години (Извор: [28])

- Првата предложена стратегија се однесува на различните активности на траса, т.е. да се одреди кога треба да се применат активности за ремонт/чистење на засторот, наместо активности за одржување (во овој случај подбивање на колосекот). Стратегијата би можела, на пример, да биде насочена кон ограничување на минималното време помеѓу две последователни активности за одржување (т.е. побивање), земајќи ја предвид реалната ситуација во пракса.
- Слика 8.а. го прикажува лимитот, односно минималното време е дефинирано како 6 месеци (182 дена), и вкупен просечен квалитет на колосекот во тек на целиот плански период е пресметан на 1,68mm (стандардна девијација).
- Може да се претпостави ограничување од 30 дена, што е екстремно, но сепак понекогаш се применува во пракса и се добива сосема поинаква ситуација, како на слика 8.б. и квалитет на колосекот од 1,71 mm стандардна девијација (полоша состојба - затоа што повисока вредност на параметарот на оваа состојба, т.е. стандардното отстапување на геометријата на трасата, претставува полоша состојба).
- Како последен тест, оваа граница, односно минималниот циклус на подбивање, може да се дефинира на повисока вредност, на пример две години, односно 730 дена, при што се добива ситуацијата прикажана на Слика 8.с, со квалитет на колосекот од 1,61 mm стандардна девијација (најдобра состојба).
- Втората предложена стратегија, односно поддршката на моделот на деградација, се заснова на дефинирање на минималното подобрување на квалитетот што се очекува да се постигне со примена на активности за одржување (подбивање). Имено, доколку подобрувањето на квалитетот (вертикалното „паѓање“ на вредноста на параметарот на графиконот) по одредена активност за одржување стане недоволно, тоа значи дека треба да се спроведе соодветна активност на ремонт (замена или поправка на засторот), наместо да се продолжи со примената

на истата активност за одржување (подбивање), која во тој случај очигледно станува неефикасна.

Структурата на системот за управување со одржување на железничката инфраструктура и неговите функционалности кои се опишани во овој труд силно го поддржуваат тврдењето дека RMMS е посебен тип на систем во железничката индустрија кој целосно го поддржува пристапот заснован на мерење и анализа на состојбите, т.н. „condition-based“ пристап во управувањето со работите за одржување и ремонт, поврзувајќи ги сите потребни податоци од елементите на железничката инфраструктура и оперативните информации, преку мерни податоци, со историјата на работи за одржување и ремонт и распределба на ресурси, преку уникатен и софистициран автоматски процес на моделирање на деградацијата и ефективно планирање на работите врз основа на правила за одлучување. Во трудот се заклучува дека RMMS овозможува вистински избор на оптимални работи за одржување и ремонт, осигурувајќи дека вистинските активности секогаш се изведуваат на вистинските места, во вистинско време и од вистински причини. Ваквиот пристап резултира со значително намалување на трошоците, а истовремено овозможува континуирана и систематска контрола на безбедноста во сообраќајот и квалитетот на сите елементи на железничката инфраструктура. Дополнително, управувачот на железничката инфраструктура добива можност да симулира, тестира и анализира различни политики за одржување и ремонт, како и да ги согледа нивните долгорочни ефекти врз состојбата и перформансите на системот.

Од сето горе наведено, трудот [28] обезбедува методолошка рамка која го демонстрира потенцијалот на математичкото моделирање на деградацијата како алатка за донесување одлуки во управувањето со инфраструктурата. Во ова истражување, овој пристап е дополнително проширен преку примена на повеќегодишни мерни серии (2017–2024) и машински модели (Random Forest, SVR и MLP) за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) и за оптимизација на бројот на интервенции.

1.5.5. Преглед и класификација на модели за предвидување на деградацијата на колосекот

Покрај применетите истражувања, трудот „Предвидување на деградација на железнички шини: Преглед на постоечката литература“ [29] обезбедува сеопфатен преглед на најсовремените пристапи и модели за предвидување на деградација во железничката инфраструктура. Во овој труд се систематизираат главните категории на модели кои се користат за анализа и прогноза на деградацијата на колосекот, и тоа: механички, статистички, детерминистички, пробабилистички, стохастички, механичко – емпириски и модели на вештачка интелигенција. Секој од нив е разгледан во контекст на неговите предности, ограничувања и практична применливост во реални услови на експлоатација.

Овој преглед на литературата покажува дека има голема варијација во моделите за деградација на колосекот. За секој тип се дефинирани силни и слаби страни. Механичките модели имаат голем број на силни страни. Тие се погодни за локални инженерски процени бидејќи трасата може да се подели на подделници, што овозможува попрецизно моделирање на однесувањето на системот при различни оптоварувања и гранични услови.

Статистичкиот пристап е поделен во три подкатегории: детерминистички, пробабилистички и стохастички модели.

- Детерминистичките модели ги поврзуваат геометриските параметри на колосекот со влијателни фактори како што се сообраќајниот обем, акумулираниот сообраќај

(MGT), оптоварување на оските, динамичко оптоварување и брзината на возовите. Тие се погодни за големи бази на податоци и овозможуваат општа проценка на стапката на деградација, но имаат ограничена прецизност при примена на делници со различен степен на користење или различни услови на одржување.

- Пробабилистичките модели се базираат на теорија на веројатност, вклучувајќи Бајесови и Маркови процеси, и користат индикатори како индекс на квалитет на колосекот (TQI), стандардна девијација на геометриските дефекти и број на ограничувања на брзина. Иако даваат добар концептуален рамковен пристап, нивната точност е ограничена поради недостиг на долгорочни, конзистентни податоци за геометриската деградација на пругите.
- Стохастичките модели претставуваат понатамошна еволуција на статистичкиот пристап и овозможуваат анализа на деградацијата како функција од времето, со вклучување на случајни варијации. Тие се покажале како мошне применливи во студии со голем број мерења и овозможуваат моделирање на нелинеарни трендови на деградација, иако бараат сложена математичка интерпретација и дополнителни калибрациони податоци.

Механичко-емпирискиот метод овозможува развој на модел за различни делници на колосекот, како што се делници во кривини, делници во правци, делници во тунел и делници на мостови. Сепак, деградацијата на колосекот кај мостови и во кривини покажува повисока стапка во споредба со делниците во правец и во тунели, поради што овој модел бара поголемо внимание, особено при планирањето на активностите за одржување и инспекција.. Иако беа пронајдени неколку истражувачки трудови за овој тип на модел, тој сè уште се применува во различни студии на случај за да резултира со намалени трошоци за идните практики за одржување.

Конечно, моделите на вештачка интелигенција се издвојуваат како најсовремен пристап во анализата на деградацијата. Иако нивната примена е сè уште релативно ограничена, тие покажуваат значителен потенцијал за автоматско препознавање на комплексни нелинеарни релации помеѓу влијателните фактори и стапката на деградација. Трудот [29] заклучува дека ваквите модели претставуваат иднина во истражувањето и управувањето со железничката инфраструктура, бидејќи овозможуваат висока точност, флексибилност и прилагодливост при работење со големи количини на податоци.

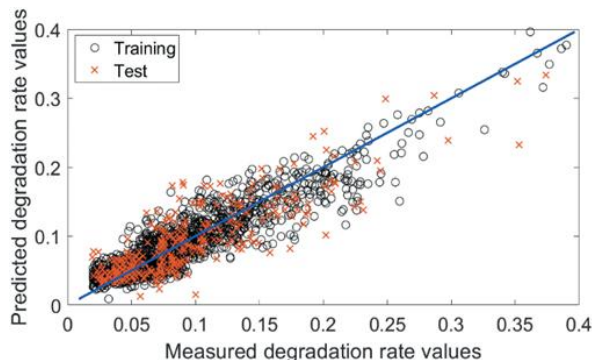
Овој преглед на современите методи овозможува цврста теоретска основа за избор на модели во оваа дисертација, каде се применува комбинација од статистички и машински пристапи со цел да се обезбеди балансиран однос меѓу инженерската интерпретабилност и предвидувачката точност.

1.5.6. Примена на вештачки невронски мрежи за предвидување на деградацијата на колосекот

Од поновите европски истражувања, особено релевантно е истражувањето „Предвидување на геометриската деградација на колосекот користејќи вештачка невронска мрежа“ [30], спроведено на делови од железничка мрежа во Шведска со вкупна должина од 216 km. Целта на студијата е да се предвиди стапката на геометриска деградација на колосекот преку примена на модел на вештачка невронска мрежа, базиран на обемна база на податоци која ги опфаќа мерењата на геометријата на колосекот, карактеристиките на инфраструктурата и историјата на одржување. Главните влезни параметри ги опфаќаат: староста на засторната призма, бројот на интервенции на подбивање, типот на шина и праг, староста на праговите, постоење на објекти како мостови и патни премини, класа на брзина,

годишна фреквенција на возови, ниво на деградација по последна интервенција, закривеност на трасата, тип на застор и тип на почва.

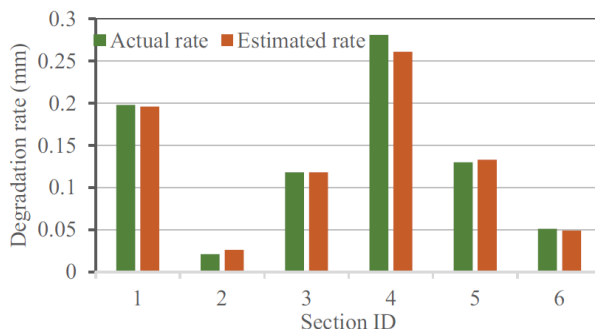
Во студијата, перформансите на моделот на невронски мрежи беа оценети со користење на коефициентот на детерминација (R^2) и просечната квадратна грешка (MSE - mean squared error) со доделување на големини на примероци за тренирање кои се движат од 20% до 90% од целата база на податоци. Од направените анализи утврдено е дека најдобриот резултат се добива кога 80% од вкупните податоци на примерокот се користат за тренирање на моделот на невронски мрежи. Затоа, 80% од податоците се искористени за тренирање на моделот и 20% од податоците се искористени за тестирање.



Слика 9. Предвидени наспроти набљудувани вредности за стапки за деградација на колосек (Извор: [30])

На слика 9 прикажан е график на предвидените наспроти измерените стапки на деградација за тренирани и тестирани податоци. Оваа слика покажува дека податоците за тренирање го покриваат целиот опсег на податоците од примерокот и дека развиениот модел на невронски мрежи може да ги предвиди податоците за тестирање на задоволително ниво во целиот опсег на базата на податоци. Пресметаните R^2 вредности за податоците за тренирање и тестирање изнесуваат 0,906 и 0,850, соодветно, што значи дека применетиот модел на невронски мрежи има прифатливи перформанси.

Со цел да се илустрира примената на предложениот модел со невронски мрежи, разработен е примерок од шест делници на железничката пруга, нивната стапка на деградација е проценета со помош на предложениот модел и споредена со реалните вредности. Слика 10 ја споредува вистинската стапка на деградација и проценетите стапки на деградација добиени со моделот на невронски мрежи. Со споредување на проценетите и реалните стапки, може да се заклучи дека предложениот модел може правилно да се користи за проценка на стапките на деградација.



Слика 10. Споредба на вистинската и проценетата стапка на деградација на примероците од шест делници од колосек на железничка пруга според моделот на вештачка интелигенција (Извор: [30])

Понатаму, со примена на Гарсоновиот алгоритам е оценета релативната важност на влезните параметри. Резултатите покажуваат дека најголемо влијание врз предвидената стапка на деградација имаат: историјата на одржување (фреквенција на подбивање), нивото на деградација по последната интервенција и бројот на возови што минуваат по трасата. Овие резултати го потврдуваат значењето на оперативните и параметрите за одржување како главни фактори во објаснувањето и предвидувањето на долгорочната деградација на геометријата на колосекот.

Ова истражување [30] претставува важен чекор во развојот на модели за предвидување на геометриската деградација со користење на методи на вештачка интелигенција, а неговиот пристап и резултати претставуваат директна методолошка инспирација за применетите модели во оваа дисертација, особено во деловите посветени на машинското учење и процената на стапката на деградација.

1.5.7. Модели за предвидување на дефекти во геометријата на колосекот

Меѓу поновите истражувања кои ја продлабочуваат анализата на геометриската стабилност на колосекот, особено се издвојува трудот „Предвидување на дефекти во геометријата на железничката пруга: студија на случај“ [31]. Во ова истражување е развиена аналитичка методологија заснована на податоци која има за цел да предвиди појава и еволуција на изолирани дефекти во геометријата на колосекот, врз основа на мерењата добиени од возови за мерење на геометријата.

Методолошкиот пристап комбинира два модели:

- 1) Линеарен модел на деградација, кој ја опишува шемата на развој на изолирани дефекти на надолжното ниво по извршена интервенција за подбивање. Овој модел овозможува да се утврди временската динамика на повторна појава на дефекти и ефективност на извршените активности за одржување. Резултатите покажуваат дека линеарниот модел е доволно стабилен и прецизен за да ја опише зависноста меѓу временскиот интервал и геометриската деградација во зоните со претходни оштетувања.
- 2) Модел заснован на бинарна логистичка регресија, кој овозможува предвидување на веројатноста за појава на изолиран дефект на конкретна делница од трасата. Во овој модел, како влезни променливи се користат стандардната девијација и куртозата на измерените вредности на надолжното ниво, два параметри кои ја опишуваат варијацијата и „острината“ на профилот на колосекот.

Преку статистичка анализа е утврдено дека куртозата е особено значаен предиктор за појава на изолирани дефекти, што значи дека делниците со поголема концентрација на екстремни вредности на геометријата имаат повисока веројатност за дефекти. Овој заклучок има голема практична вредност, бидејќи обезбедува мерлив индикатор за ризик кој може да се интегрира во системите за превентивно одржување.

Покрај тоа, анализирана е и ефективност на интервенциите за подбивање, при што покажано е дека по изведуваче на подбивањето, дефектите повторно се појавуваат со приближно предвидлива брзина на деградација, што овозможува проценка на оптималниот интервал помеѓу две интервенции. Овој аспект е од особено значење за оптимизација на стратегиите за одржување на геометријата на колосекот.

Трудот [31] претставува значаен придонес во насока на предиктивно моделирање на изолирани дефекти и поставува темели за развој на интегрирани модели кои комбинираат мерења, статистичка анализа и машинско учење за навремено идентификување на ризични

делови од трасата. Овој пристап е особено релевантен за истражувањата во оваа дисертација, бидејќи се базира на ист тип на податоци, геометриски мерења на колосекот – и се стреми кон развој на прогностички модели за деградација и оптимално одржување.

1.5.8. Модели за поддршка на одлучувањето во управувањето со железничката инфраструктура засновани на RAMS и LCC анализи

Meѓу најсовремените трудови кои го разгледуваат управувањето со железничката инфраструктура од аспект на сигурност, достапност, одржливост и економска ефикасност, се издвојува докторската дисертација „Модели за поддршка на одлуки за одржување на железничката инфраструктура користејќи RAMS и LCC анализи“ [32]. Ова истражување претставува целосна рамка за примена на концептите RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, and Safety) и LCC (Life Cycle Cost) во процесите на одржување и управување со инфраструктурата, со фокус на развој на модели за поддршка на одлучувањето при дефинирање на приоритетите за интервенции и распределба на ресурси.

Основната цел на истражувањето е да се обезбеди систематски пристап кој ќе му помогне на управителот на инфраструктурата да донесува технички и економски оправдани одлуки, засновани на мерење и квантитативна проценка на перформансите на железничките системи. Во рамките на дисертацијата се разгледани повеќе модели кои го поврзуваат нивото на сигурност и достапност на инфраструктурните елементи со трошоците на нивниот животен циклус, што овозможува целосна проценка на ефектите од различни стратегии за одржување, како на техничко, така и на финансиско ниво.

Моделите се насочени кон следните клучни цели:

- квантитативна проценка на влијанието на различни стратегии за одржување врз RAMS индикаторите;
- оптимизација на периодичноста на инспекциите и интервенциите;
- минимизирање на трошоците на животниот циклус (LCC) преку избалансирано донесување на одлуки;
- обезбедување податоци за управување со ризиците од железничката инфраструктура.

Иако истражувањето обезбедува цврста методолошка рамка за анализа на одржувањето преку RAMS и LCC принципи, идентификувана е и одредена ограниченост на предложените модели. Имено, моделите не го разгледуваат доволно интерактивниот ефект помеѓу различните подсистеми (на пример: колосек, контактна мрежа, сигнално-сигурносни системи), ниту нивното заемно влијание врз долгорочната политика на одржување. Сепак, тие успешно овозможуваат структурирана поддршка за одлучување при избор на приоритетни активности, дефинирање на оптимални циклуси на одржување и управување со ризиците поврзани со сигурноста и достапноста на инфраструктурата.

Како заклучок, дисертацијата [32] претставува значаен придонес кон развојот на современите системи за управување со инфраструктурата базирано на перформанси (performance-based), преку интеграција на техничките параметри за сигурност и одржливост со економските индикатори за животен циклус. Овој пристап овозможува воспоставување на долгорочни стратегии за одржување кои се истовремено безбедни, финансиски оправдани и ефикасни, а концептите презентирани во трудот се директно применливи за понатамошен развој на модели за оптимизација на железничката инфраструктура како што е предложено во оваа докторска дисертација.

Овие RAMS/LCC рамки овозможуваат квантитативно поврзување на сигурноста и достапноста со трошоците на животниот циклус, што претставува основа за интегрирано и performance-based управување.

1.5.9. Модели и методи за интегрирано управување со железничката инфраструктура

Посебно значаен придонес кон областа на управувањето со железничката инфраструктура претставува докторската дисертација „Експлоатација и одржување на железничката инфраструктура – Модели и методи“ [33], во која е развиен сеопфатен системски пристап за оценување и подобрување на перформансите на инфраструктурата преку интеграција на експлоатационите и податоците за одржување. Истражувањето е насочено кон создавање унифициран модел на перформанси, кој овозможува анализа на меѓусебните односи меѓу елементите на железничкиот систем и нивното влијание врз севкупната ефикасност на работењето.

Основната идеја на дисертацијата е дека, традиционалните системи за одржување често функционираат изолирано, без доволна поврзаност меѓу оперативното, тактичкото и стратешкото ниво на управување. За таа цел, авторот развива модел на врска и ефект (Link–Effect Model), кој ги поврзува показателите за експлоатација и одржување со организациските и техничките фактори што влијаат врз нив. Моделот овозможува идентификација на клучните области со потенцијал за континуирано подобрување и дефинирање на приоритетни активности за одржување и оптимизација на ресурси.

Во рамките на истражувањето е воспоставена детална методолошка рамка која ги комбинира квантитативните и квалитативните пристапи:

- квантитативниот дел ги обработува мерените податоци за состојбата на колосекот, трошоците за одржување, бројот и фреквенцијата на интервенции, како и податоци за инфраструктурните дефекти и застои во сообраќајот;
- квалитативниот дел ги опфаќа организациските аспекти, процедурите за управување и односот меѓу засегнатите страни (оператори, управувач со инфраструктура, изведувачи и регулаторни тела).

Примената на моделот е илустрирана преку студија на случај на Iron Ore Line во северна Шведска, една од најоптоварените товарни железници во Европа. На оваа линија е извршена споредба на реалните податоци за одржување и перформансите добиени со моделот. Резултатите покажуваат дека моделот може да ги идентификува клучните фактори кои предизвикуваат деградација и оперативни застои, како и да ја оцени ефикасноста на различни стратегии за одржување.

Дисертацијата дополнително анализира како различните засегнати страни во железничкиот систем ги користат и применуваат концептите на стратешко планирање, и утврдува дека нивото на интеграција меѓу стратешките, тактичките и оперативните процеси е недоволно усогласено. Од ова произлегува заклучокот дека долгорочната одржливост и економичност на железничките системи може да се постигне само преку воспоставување на интегрирано управување со инфраструктурата, каде одлуките се базираат на податоци и индикатори на перформанси, а не на фиксни циклуси на одржување.

Со тоа, оваа докторска дисертација претставува значаен чекор во развојот на современите системи за управување со железничката инфраструктура. Нејзиниот пристап комбинира технички, организациски и стратешки компоненти во еден кохерентен модел, кој може да се примени како основа за оптимизација на интервенциите, намалување на

трошоците и зголемување на сигурноста и ефикасноста на железничкиот систем. Принципите презентирани во ова истражување се во согласност со европските насоки за воведување на управување врз основа на перформанси на инфраструктурата (performance-based infrastructure management) и имаат значајно влијание врз идните концепти за дигитализација и предиктивно одржување во железничкиот систем.

1.5.10. Заклучоци од прегледот на претходните истражувања

Како заклучок од прегледот на досегашните трудови и истражувања, може да се согледа дека, значителен број студии на европско и регионално ниво ги обработуваат прашањата на одржувањето, деградацијата и управувањето со железничката инфраструктура, но ретко преку долгорочен и модел заснован на податоци кој ги интегрира техничките и економските аспекти на системот. И покрај напредокот во развојот на методи како condition-based maintenance, RMMS и пристапи за машинско учење, во рамките на регионот на Западен Балкан сè уште не постои унифициран и систематизиран методолошки пристап за моделирање на деградацијата на колосекот и оптимизација на интервенциите.

Во таа насока, податоците добиени од Јавното претпријатие „Железничка инфраструктура на Црна Гора“ претставуваат клучна основа за ова истражување. Тие обезбедуваат реални, конзистентни и технички проверени информации за состојбата на колосекот, изведените активности и динамиката на одржување, што овозможува нивна директна примена во развиените модели и анализи. Воспоставениот информациона систем на претпријатието овозможува дополнителна вредност, преку можност за практична имплементација и валидација на предложените методи.

Покрај овие податоци, анализата на законските и техничките акти, како и на конкретните проблеми во тековното одржување, овозможува синтеза на нов концепт на управување со одржувањето на железничката инфраструктура, кој може да послужи како основа за понатамошни истражувања насочени кон дигитализација, предиктивно моделирање и оптимизација на интервенциите. Со тоа, ова истражување поставува научна и практична подлога за развој на современ систем врз основа на перформанси на инфраструктурата, односно врз реално измерени параметри што ја опишуваат нејзината состојба и функционално однесување, што директно води кон методолошката поставеност.

1.6. Содржина на трудот

Во рамките на докторската дисертација со наслов: „Геометриско деградирање на колосекот кај железнички пруги и нивно одржување“ сите анализи се систематизирани во поголем број поглавја.

Во првото поглавје, насловено Вовед, се поставува основата на истражувањето и се дефинираат неговата цел, значење и контекст во рамките на современото железничко инженерство. Истражувањето се темели на потреба од зголемено подобрување на системите за управување со состојбата на железничките пруги, особено во услови на зголемена експлоатација, стареење на инфраструктурата и ограничени финансиски ресурси. Преку преглед на актуелните состојби во железничкиот сектор се нагласува дека геометриската деградација на колосекот претставува еден од најкритичните индикатори за безбедност и стабилност на системот.

Исто така, опфатени се и теоретските и практичните аспекти на проблемот, причините што водат до деградација (динамички сили, геотехнички услови, климатски фактори и интензитет на сообраќај), како и последиците по стабилноста, удобноста и оперативните трошоци. Даден е преглед на досегашните истражувања и европски искуства

во анализата на индексот на квалитет на колосекот (TQI), при што се констатира дека во поширокиот регион ваквите истражувања се ограничени по обем и методологија.

Во завршниот дел од поглавјето се дефинирани целите на истражувањето: развој на квантитативен модел за предвидување на состојбата на колосекот врз основа на податоци од мерења, идентификација на влијателните параметри, анализа на трендовите на деградација и оптимизација на фреквенцијата на машинските интервенции. Се утврдува и основната хипотеза дека правилно дефиниран и валидиран модел може да овозможи поефикасно и економски оправдано управување со железничката инфраструктура.

Во второто поглавје, Железничка инфраструктура, се опишува железничкиот систем како сложена техничко-технолошка целина составена од бројни меѓусебно зависни елементи. Инфраструктурата е разгледана преку своите два основни дела, долниот и горниот строј, кои заедно ја формираат носечката конструкција на трасата. Детално се анализираат функциите и материјалите на секој елемент: насипи, ископи, потпорни конструкции и дренажи кај долниот строј, како и шини, прагови, засторна призма и колосечен прибор кај горниот строј.

Поглавјето објаснува на кој начин овие елементи со тек на време подлежат на структурни промени под влијание на оптоварувањата и климатските фактори, што доведува до појава на геометриски неправилности. Нагласено е дека процесот на деградација е неизбежен, но може да се контролира со правилно дефинирани програми за одржување и навремена интервенција.

Посебно внимание е посветено на класификацијата и методологијата на одржување, превентивно, корективно и капитално, и нивната примена во европската и домашната практика. Превентивното одржување се дефинира како стратегија за спречување на дефекти преку континуирано следење, додека корективното се применува кога деградацијата надминува дозволени вредности. Во контекст на современите системи, опишани се технолошките иновации во мониторингот на состојбата на колосекот: ласерски и инерцијални сензори, GPS и LIDAR системи интегрирани во мерни коли.

Поглавјето завршува со осврт на нормативната рамка, EN 13848 и UIC 518, кои претставуваат стандардна техничка основа за мерење и оценување на геометријата на колосекот, како и предуслов за интероперабилност и хармонизација на железничките системи во рамките на Европа.

Во третото поглавје, Железничката инфраструктура во Црна Гора, се дава детален преглед на историскиот развој, карактеристиките и современите предизвици на железничкиот систем во државата. Почетниот дел дава историски контекст од почетокот на XX век, преку изградбата на линијата Белград – Бар во 1976 година, до денешните услови на експлоатација. Главен предмет на анализа е делницата Врбница – Бар, како дел од стратешката транспортна оска со клучно значење за економијата и регионалната поврзаност.

Детално се опишани нејзините конструктивни и геометриски параметри: минимален радиус на кривини од 300 m, максимален надолжен наклон од 25‰ и дозволени брзини од 70–100 km/h. Презентирани се материјалните и конструктивни својства на горниот строј (шини тип S49E1, претежно дрвени прагови, варовнички застор и системи за прицврстување K и SKL), како и инфраструктурните објекти, 107 тунели, 108 мостови и бројни потпорни сидови.

Поглавјето дава и преглед на организацијата и состојбата на железничкиот сообраќај, каде што се истакнува дека реалните транспортни обеми се значително пониски од проектните капацитети. Понатаму, се дискутираат економските ограничувања, староста на инфраструктурата и честите појави на геотехничка нестабилност, кои ја зголемуваат сложеноста на одржувањето. Завршниот дел се однесува на системот за одржување во Црна Гора, типични методи, организациски модел и потребата од модернизација и усогласување со европските стандарди.

Во четвртото поглавје, Мерење на геометриската состојба на колосекот на пругата Врбница – Бар, се обработуваат методите и технологиите за мониторинг и мерење на состојбата на колосекот. Детално се опишани системите за бесконтактно мерење и калибрација со мерни коли (EM 80L, EM 120 и Sever 1435), кои овозможуваат прецизно мерење на параметрите на геометријата: ширина на колосекот, надвишување, витоперење, надолжна и хоризонтална геометрија.

Презентирани се методите на обработка на податоците и начинот на прикажување преку графички и нумерички извештаи. Поглавјето ги опишува циклусите на мерења спроведени во периодот 2017–2024 година и нивната улога во следење на промени во состојбата на трасата низ времето. Со помош на овие мерења се овозможува идентификација на делници со повисок ризик, давање приоритет на интервенции и подобро планирање на трошоците за одржување. Овој дел ја нагласува важноста на редовниот мониторинг како основа за премин од реактивно кон проактивно управување со инфраструктурата.

Во петтото поглавје се разработува системот на податоци што претставува темел на истражувањето. Податоците се поделени во четири категории, геометриски, инфраструктурни, експлоатациони и податоци за активности на одржување, со прецизно објаснување на нивното потекло, карактер и инженерска релевантност. Се опишува процесот на стандардизација, нормализација и поделба на трасата во хомогени 20-метарски сегменти.

Посебно внимание е посветено на интеграцијата на повеќегодишни мерења (2017, 2019, 2022 и 2024 година), што овозможува анализа на временската динамика на деградацијата. Воведувањето на индексот на квалитет на колосекот (TQI) како збирен индикатор, согласно EN 13848, овозможува унифицирано мерење и споредба на состојбата низ целата делница. Овој дел ја воспоставува аналитичката основа за сите понатамошни модели и претставува премин кон методолошкиот дел на трудот.

Во шестото поглавје, Методологија, се презентира централниот дел на трудот. Поглавјето е структурирано низ последователни чекори: обработка на податоци, анализа на важноста на атрибутите, изработка и валидација на предвидувачки модели, анализа на деградација и оптимизација на интервенции. Прво, се објаснува процесот на нормализација и елиминација на аномалии во податоците. Потоа се применуваат алгоритми за проценка на влијателност на променливите (Random Forest и Permutation Importance), што овозможува избор на најрелевантните фактори за моделирање.

Следува развој на повеќе типови модели: статистички (линеарна, полиномна и ridge регресија) и машински (Random Forest, SVR и MLPRegressor). Секој модел е валидиран со 5-fold cross-validation и е евалуиран според мерките R^2 , MAE, RMSE и MSE. Преку ова се обезбедува сигурна споредливост на нивната точност и стабилност.

Во продолжение се обработуваат напредните аналитички постапки, анализа на годишната стапка на деградација, анализа на континуирана деградација со примена на *piecewise* или сегментирана регресија и модел за оптимизација на бројот на машински интервенции преку симулациски мрежни пребарувања (*grid-search*). Овие пристапи овозможуваат интегрирана процена на краткорочните и долгорочните ефекти од одржувањето и идентификација на оптималниот број интервенции што постигнуваат најдобар компромис меѓу стабилност и економска ефикасност. На крај, се прикажани ограничувањата на методологијата и можностите за нејзина надградба во идни истражувања.

Во седмото поглавје, „Резултати“, презентирани и систематизирани се сите добиени резултати. Поголавјето е поделено во четири главни целини кои го следат логичкиот редослед на анализите: најпрво се прикажани резултатите од анализата на влијателните параметри, спроведена со примена на *Random Forest* и стратегијата *LOOCV*, преку која се оценува релативната важност на геометриските, инфраструктурните, оперативните и променливите за одржување. Следува делот со резултатите од моделите за предвидување на *TQI*, каде се прикажуваат перформансите на статистичките и машинските модели и нивната точност во репродуцирање на измерените податоци. Понатаму, е изведена анализа на стапката на деградација на колосекот низ трите временски интервали (2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024), со идентификација на делници со изразено влошување и просторни разлики долж трасата. На крајот, се прикажани резултатите од оптимизацијата на бројот на машински интервенции со примена на *Random Forest* и *Grid Search* методи, преку кои е определена точката на заситеност, односно бројот на интервенции што обезбедува најповолен баланс помеѓу краткорочниот ефект и долгорочната стабилност на системот. Во целина, ова поглавје овозможува интегриран увид во процесите на деградација, влијанието на параметрите и ефективноста на различните стратегии за одржување.

Во осмото поглавје, Дискусија, резултатите се синтетизирани и интерпретирани во поширок инженерски контекст. Преку споредбена анализа се оценува точноста, стабилноста и применливоста на секој модел, како и нивната способност да ги опфатат нелинеарните односи меѓу параметрите. Дискусијата ја опфаќа и разликата меѓу краткорочниот и долгорочниот ефект на машинските интервенции, идентификација на делници со повторлива деградација и потенцијални зони за реконструкција. Посебен дел е посветен на инженерската интерпретација на резултатите и нивната практична употреба во рамки на системите за одржување на инфраструктурата. На крај, се дефинирани насоки за идни истражувања, проширување на моделот со климатски и геотехнички параметри, вклучување на економски аспекти и интеграција со системи за предиктивно управување.

Во завршното, деветто поглавје се дадени заклучните согледувања од истражувањето, при што се резимирани најважните резултати и научни придонеси на трудот. Посебен акцент е ставен на препораките за унапредување на процесите на одржување на железничката инфраструктура и примената на предиктивни модели во инженерската практика. Поголавјето содржи и краток осврт на претходните анализи, како и поширок поглед кон перспективите на одржувањето и управувањето со состојбата на колосекот во годините што следуваат, во контекст на технолошките и организационите промени во железничкиот систем.

2. ЖЕЛЕЗНИЧКА ИНФРАСТРУКТУРА

Согласно Законот за железници („Службен весник на РМ“, бр. 64/05), железничката инфраструктура претставува интегриран техничко-технолошки систем што ги опфаќа железничките пруги со горен и долен строј, колосеците, ранжирните станици, објектите на електрична влека, сигнално-сигурносните, телекомуникациските и информациските системи, како и земјиштето и воздушниот простор кои функционално ѝ припаѓаат на пругата [34, 35, 36, 37, 38]. Железничката инфраструктура обезбедува безбедно, стабилно и сигурно функционирање на железничкиот транспорт и претставува основен предуслов за неговата техничка и економска одржливост.

Планирањето на изградбата, реконструкцијата и одржувањето на инфраструктурата се спроведува преку Националната програма за железничка инфраструктура, која е основен документ за определување на приоритетите во развојот и модернизацијата на железничката мрежа. Програмата овозможува усогласување на националното законодавство со европските регулативи и меѓународните договори, како и интеграција во развојните планови на Трансевропските транспортни мрежи (TEN-T) [39].

Благодарение на развиената железничка инфраструктура и поврзаноста на системите, европскиот континент денес претставува единствен транспортен простор што овозможува ефикасно движење на патници и стоки на долги релации. Железницата е еден од стратешките сегменти на европската политика за транспорт и заштита на животната средина, со континуирана поддршка за развој на нови технологии и воведување дигитални решенија. Земјите од Европската унија посветуваат особено внимание на изградбата и модернизацијата на пругите со високи техничко-технолошки стандарди, кои се дел од трансевропските мрежи за брзи и конвенционални пруги.

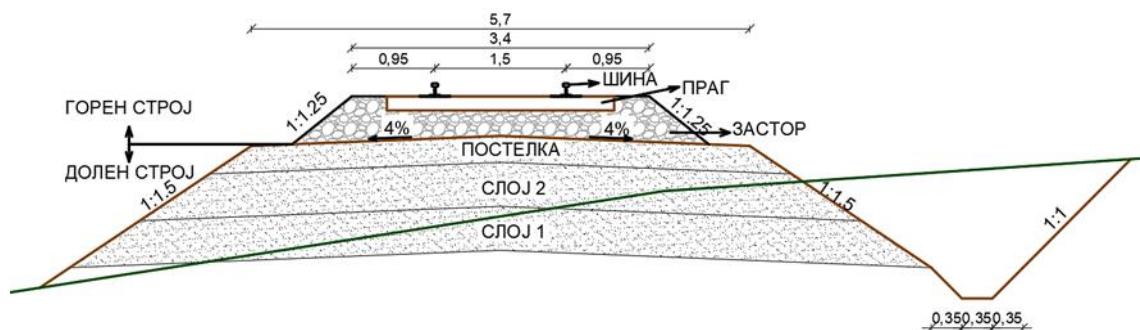
Трансевропската железничка мрежа (TEN-T) го опфаќа системот на паневропски транспортни коридори воспоставени на меѓународните конференции во Крит (1994) и Хелсинки (1997) [39]. Овие коридори ја поврзуваат железничката инфраструктура на земјите од Европската унија со клучните регионални правци и соседните континенти, овозможувајќи интегриран транспортен систем. Политиката на ЕУ има за цел преку развој на железничкиот сообраќај да го намали притисокот врз патната инфраструктура, да ја зголеми енергетската ефикасност и да придонесе кон долгорочна одржливост на транспортниот сектор.

Железничката инфраструктура е јавно добро и претставува сопственост на државата [34]. Според Правилникот за одржување на железниците [40], железничките линии се класифицираат според:

- ширината на колосекот: нормален (1435 mm) и тесен (760 mm);
- бројот на колосеци: едноколосечни, двоколосечни и повеќеколосечни;
- значењето и обемот на сообраќајот: главни (I и II ред со нормален колосек) и споредни линии (III ред со нормален или тесен колосек).

2.1. Елементи на железничката пруга

Пругата, како основен елемент на железничката инфраструктура, се состои од долен и горен строј, чија меѓусебна интеграција обезбедува носивост, трајност и стабилност на конструкцијата [41].



Слика 11. Составни елементи на железничката пруга прикажани во попречен пресек (сопствен извор)

Долниот строј претставува градежна подлога на колосекот и ги вклучува земјените работи, одводнувањето, потпорните конструкции и останатите инженерски објекти. Неговата основна улога е да ги пренесува и рамномерно распоредува оптоварувањата од горниот строј кон подлогата, обезбедувајќи долготрајна стабилност на пругата. Квалитетно изведениот долен строј е предуслов за сигурно функционирање и економично одржување на инфраструктурата [42].

Горниот строј ги прима силите од возилата и ги пренесува на долниот строј. Тој се состои од шини, прагови, колосечен прибор и засторна призма од толченик. Овие компоненти заедно ја формираат т.н. колосечна рамка, чија еластичност и геометриска исправност се клучни за стабилноста и удобноста при движењето на возилата. Современите колосечни конструкции се резултат на повеќедецениска еволуција и го вклучуваат користењето на долги шински ленти, бетонски прагови, потешки профили на шини, еластични прицврстни елементи и механизирани методи за одржување и мерење на геометријата [43, 42, 44].

Изборот на тип на колосек зависи од проектните брзини, осовински оптоварувања, очекуваниот век на траење и достапноста на материјали. При изборот се применува принципот на анализа на трошоци во животниот циклус (Life-Cycle Cost – LCC), со цел да се постигне најповолна рамнотежа помеѓу почетните инвестиции, трошоците за одржување и вкупната економска ефикасност [32, 33].

Шините се основен носечки елемент кои ги прифаќаат вертикалните, хоризонталните и надолжните сили од возилата и ги пренесуваат кон праговите. Тие обезбедуваат континуитет на движењето, стабилно водење на тркалата и геометриска точност на трасата [43]. Стандардната ширина на колосекот изнесува 1435 mm.

Праговите ја одржуваат константната ширина на колосекот и ги пренесуваат оптоварувањата на засторот. Тие мора да имаат доволна контактна и бочна површина за да обезбедат отпор на надолжни и попречни поместувања. Најчесто се изработуваат од армиран бетон поради трајност и отпорност на динамички влијанија [33].

Колосечниот прибор служи за прицврстување и стабилизирање на шините и за обезбедување еластична врска меѓу поединечните компоненти. Соодветниот избор на приборот ја намалува крутоста на системот и ги апсорбира динамичките вибрации што настануваат при поминување на возилата [33, 43].

Засторот претставува еластична подлога на која се потпира колосечната рамка. Неговата функција е да ја дренира водата, да ги стабилизира праговите и да го пренесува оптоварувањето на долниот строј со рамномерна распределба на притисоците. Квалитетот на материјалот и правилната геометрија на засторната призма директно влијаат на

сигурноста и комфорот при возење [42]. Соодветно димензиониран застор овозможува движење на возила со брзини над 200 km/h и значително го продолжува векот на конструкцијата [33].

Во статичка смисла, колосекот може да се разгледува како систем од континуални надолжни греди (шини) поврзани со попречни греди (прагови) и потпрени на еластична подлога (застор). Ваквата конструкција обезбедува рамномерна распределба на напрегањата и оптимален одговор на динамичките сили [42, 43].

Современите барања поставени пред железничкиот колосек опфаќаат неколку клучни аспекти: обезбедување на сигурно и стабилно поминување на возилата при проектираните оптоварувања и брзини, одржување на геометриската исправност во текот на експлоатацијата и постигнување на висок степен на удобност при возење [43, 33]. Дополнително, конструкцијата мора да обезбеди сигурна електроизолација за потребите на сигнално-сигурносните системи [44], минимално пренесување на вибрации и бучава во околината [42], рационални трошоци за погон и влека [32], како лесна изведба и економично одржување [7, 33].

2.2. Одржување на железничката инфраструктура

Одржувањето претставува систематски процес кој опфаќа технички, административни и организациони активности насочени кон задржување или обновување на функционалната состојба на инфраструктурните елементи. Целта на овој процес, според Пинтелон и Пароди-Херц (2008), е оптимизација на животниот век на сите компоненти на железничкиот систем [45]. Со оглед на комплексноста на инфраструктурата и нејзината зависност од повеќе инженерски дисциплини, вредноста на одржувањето не може секогаш да се изрази преку едноставни економски показатели [32, 45].

Современите железнички системи, под влијание на технолошкиот напредок и зголемените барања за сигурност и достапност, постепено преминуваат од традиционални корективни кон превентивни и предвидливи стратегии на одржување. Основната стратегија за одржување ја дефинира соодносот меѓу инвестициите, интервенциите и потребниот квалитет на инфраструктурата, со цел постигнување на оптимален сообраќаен капацитет и безбедност [32, 45].

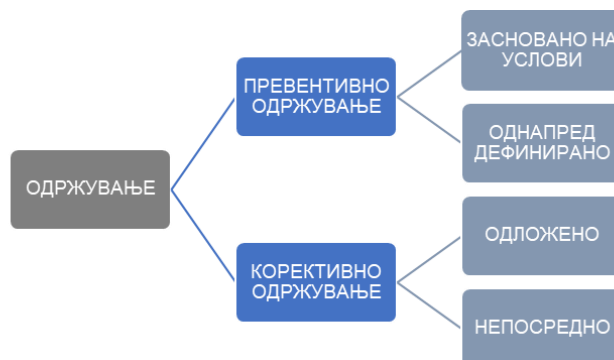
Инвестициите за одржување се спроведуваат циклично и се засноваат на следење на состојбата на пругата, особено на нејзината геометрија и конструктивните елементи [33]. Навремена реконструкција и замена на истрошените елементи овозможува одржување на дозволените брзини и проодност на системот, при што се минимизираат трошоците за тековно одржување [46].

Одржувањето на железничките пруги е комплексна и капитално интензивна активност, која претставува околу 17–20% од вкупните експлоатациони трошоци [46]. Состојбата на горниот и долниот строј директно влијае врз трошоците за влека, пропусната моќност и рационалното користење на возните средства.

Процесот на одржување има двоен карактер – обезбедување на исправна состојба на постојната инфраструктура и континуирано усовршување на методите, технологиите и материјалите. За таа цел се спроведува континуирано собирање и анализа на податоци од терен, со цел идентификација на причините за деградација, оценка на последиците врз безбедноста и трошоците, и дефинирање на најрационални мерки за санација и заштита [23, 33, 46].

2.2.1. Поделба на работите за одржување на железничките пруги

Според стратегискиот приод, одржувањето на пругите се дели на превентивно и корективно [47].



Слика 12. Поделба на работите за одржување

Превентивното одржување е стратегија насочена кон спречување на потенцијални проблеми, а не директно кон решавање на регистрирани дефекти. Оваа форма на одржување се фокусира на одржување на инфраструктурата во оптимална состојба и се дели на две главни подкатегории:

- **Одржување засновано на услови**

Оваа подкатегорија вклучува активности кои се иницираат врз основа на резултатите од редовните инспекции и проценки на состојбата на инфраструктурата. Инспекциите овозможуваат рано откривање на потенцијалните проблеми, со што се минимизира ризикот од нивно влошување. Навремените интервенции, базирани на добиените податоци, придонесуваат за зголемување на сигурноста и ефикасноста на железничкиот систем [7, 48].

- **Одржување со однапред дефинирани периоди**

Оваа подкатегорија се однесува на активности кои се спроведуваат во однапред утврдени временски интервали, врз основа на предвидениот животен циклус на инфраструктурните компоненти. Таквиот пристап овозможува подобра организација и распределба на ресурсите, како и намалување на оперативните трошоци. Дополнително, предвидената периодичност на овие активности го олеснува процесот на планирање и придонесува за стабилност и долговечност на железничката инфраструктура [49].

Корективното одржување на железничките пруги претставува еден од клучните аспекти на управувањето со инфраструктурата. Оваа форма на одржување вклучува активности насочени кон поправка на дефекти, со цел да се зачува функционалноста и безбедноста на железничкиот систем. Корективното одржување се дели на две главни категории: одложено и непосредно одржување, секоја со своја специфична улога и значење.

- **Одложено одржување**

Одложеното одржување се однесува на дефекти кои се евидентирани, но не претставуваат непосредна опасност за безбедноста или оперативноста на пругата. Овие дефекти се групираат и се решаваат како дел од однапред планирани интервенции. Карактеристиките и придобивките на овој тип одржување вклучуваат ефикасност во планирањето, што овозможува оптимизација на работната сила, материјалите и опремата. Дополнително, одложеното одржување придонесува за намалување на трошоците, бидејќи групирањето на дефектите за време на една интервенција ги намалува оперативните и

логистичките трошоци. Овој пристап води до поголема продуктивност, бидејќи времето потребно за одржување е подобро искористено со истовремено решавање на повеќе проблеми. Како на пример, дефекти како што се мали оштетувања на шини, попуштање на споеви или минимални деформации на трасата може да се планираат за време на периоди на редовно одржување или при прекини на сообраќајот [49, 50].

- Непосредно одржување

Непосредното одржување се фокусира на дефекти кои бараат итна интервенција поради нивната сериозност и влијание врз безбедноста или оперативноста на железничкиот систем. Карактеристиките и придобивките на овој тип одржување вклучуваат итност на интервенциите, при што решавањето на дефекти како што се пукнати шини, големи деформации или откажување на сигнализацијата е критично за избегнување на несреќи. Дополнително, непосредното одржување обезбедува висок степен на безбедност преку брзи интервенции кои го минимизираат ризикот од поголеми инциденти. Во ситуации кога е потребно, се наметнуваат ограничувања на брзината или прекини во сообраќајот за да се овозможи безбедност додека трае интервенцијата. Како пример, итната интервенција за поправка на пукната шина или стабилизација на дел од пругата поради лизгање (свлекување) на земјиштето се типични случаи на непосредно одржување [51].

Корективното одржување игра витална улога во одржувањето на интегритетот на железничката инфраструктура. Како што истакнуваат Zakeri et al. (2015), правилното менаџирање на корективните интервенции може да доведе до значителни заштеди во трошоците и да го зголеми нивото на безбедност [52]. Комбинирањето на одложените и итните интервенции создава интегриран пристап кој овозможува оптимизација на ресурсите, минимизирање на трошоците и максимизирање на времето на оперативност. Благодарение на ваквиот стратешки пристап, железничкиот систем функционира со минимални прекини и повисоко ниво на безбедност, додека редовното решавање на дефектите го продолжува животниот век на пругата и другите инфраструктурни компоненти [53].

Процесот на одржување треба да се подели на корективно и превентивно одржување, каде што превентивното одржување се заснова на состојбата или времето. Добрата стратегија е да се минимизира корективното одржување и да се промени одржувањето засновано на време во одржување засновано на услови [27].

2.2.2. Поделба на работите на одржување според обемот на работа

Работите на одржување на железничката инфраструктура, според нивниот обем и интензитет, се групираат во три основни категории: тековно (редовно), инвестициско и капитално (ремонтно) одржување. Дополнително, реконструкциите на делови од пругата или на поединечни објекти се третираат како посебни инвестициони зафати изведени врз основа на проектна документација [54].

Тековното одржување претставува систем на континуирани активности насочени кон зачувување на исправната геометрија и функционалност на колосекот во рамки на пропишаните граници. Овие интервенции го забавуваат процесот на деградација на материјалот и овозможуваат безбедно одвивање на сообраќајот со пропишани брзини и осовински оптоварувања [12, 49]. Во современата пракса, тековното одржување може да се спроведува периодично или врз основа на состојбата на инфраструктурата (СВМ), при што вториот пристап овозможува поголема ефикасност и намалени трошоци благодарение на систематскиот мониторинг и анализа на состојбата [12, 55].

Инвестициското одржување опфаќа активности со поголем обем и трајност, насочени кон обновување на истрошени или нефункционални елементи на инфраструктурата. Целта е да се обезбеди долготрајна стабилност и безбедност на колосекот, како и подобрување на капацитетот на пругата [12, 56]. Овие активности обично вклучуваат замена или зајакнување на елементите на горниот строј, усогласување на геометријата и подобрување на физичките својства на засторот и колосечниот прибор [12, 55].

Капиталното одржување (главни поправки) претставува највисок степен на интервенција и се применува кога тековното и инвестициското одржување не се доволни за одржување на безбедноста и функционалноста на пругата. Овој процес подразбира целосна реконструкција или обнова на колосекот и придружните елементи, со цел продолжување на животниот век на инфраструктурата и усогласување со зголемените барања за брзина и осовинско оптоварување [12, 49, 57].

Реконструкциите се спроведуваат во случаи кога е потребно значително техничко подобрување на трасата или нејзините делови (на пример зголемување на радиуси на кривини, должина на преодници или подобрување на попречен наклон). Овие зафати претставуваат инвестициони проекти со долгорочен карактер и суштински придонесуваат кон модернизација и конкурентност на железничкиот транспорт [58].

2.2.3. Поделба на работите на одржување според годишните времиња

Активностите за одржување на железничките пруги се спроведуваат во текот на целата година, при што нивниот обем и карактер се приспособуваат на сезонските услови. Поради променливите влијанија на температурата, влагата и замрзнувањето, планирањето на работите мора да биде усогласено со временските прилики, со цел да се зачува функционалноста и безбедноста на колосекот [59].

Во пролетниот период најчесто се изведуваат активности за санација на оштетувањата предизвикани од зимските услови, како што се корекции на геометријата и стабилизирање на засторот. Летниот период е ограничен од високите температури и затоа се користи за работи со помал интензитет, како чистење на канали и одстранување на вегетација. Во есенските месеци се врши подготовка на инфраструктурата за зимскиот режим, преку подобрување на одводнувањето и проверка на техничката исправност на системите. Зимскиот период е најкритичен за експлоатација, бидејќи бара континуирано чистење на снег и мраз, надзор на состојбата на шините и превенција од појава на пукнатини и ладење на металот [60].

Сезонската организација на одржувањето претставува составен дел од системот за управување со железничката инфраструктура, бидејќи овозможува навремено реагирање на климатските влијанија и минимизирање на ризиците од дефекти и нарушувања во сообраќајот.

2.2.4. Значење на правилното и навремено извршување на работите за одржување на железничката пруга

Правилното и навремено извршување на работите за одржување претставува суштински предуслов за сигурност, стабилност и економичност на железничкиот систем. Управителот на инфраструктурата е должен да обезбеди континуирана исправност на сите потсистеми во согласност со националните технички правила и со утврдените стандарди за безбедност и функционалност [61].

Квалитетот на одржувањето директно влијае врз основните параметри на експлоатацијата, брзината на движење, осовинскиот притисок, безбедноста на сообраќајот и комфорот при патувањето. Брзината и стабилноста на движење зависат од прецизноста на геометријата на колосекот, која може да се обезбеди само со редовно одржување и навремена корекција на неправилностите. Паралелно со тоа, оптималното распоредување на осовинските оптоварувања е клучно за спречување на прекумерни напрегања и оштетувања на инфраструктурата, а тоа бара систематско следење на состојбата и примена на аналитички модели за предвидување на деградацијата [9, 62].

Современите системи за одржување сè повеќе се насочени кон проактивен пристап базиран на податоци, каде што сензорски технологии, вибрациони и звучни анализи, како и системи за интелигентно управување, овозможуваат континуиран мониторинг на состојбата на пругата. На тој начин, дефектите се детектираат и коригираат во рана фаза, пред да се развијат во критични проблеми, што значително ги намалува трошоците и ризиците [63, 64].

Редовното и квалитетно одржување не само што го продолжува животниот век на инфраструктурата, туку и ја подобрува енергетската ефикасност, ја намалува бучавата и вибрациите и придонесува кон повисок квалитет на патничкото искуство. Дополнително, стабилната и добро одржувана мрежа овозможува сигурен товарен транспорт и повисоко ниво на доверба кај корисниците, што ја зголемува конкурентноста на железницата во однос на другите видови транспорт [65, 66, 63].

Во современи услови, систематското планирање и употребата на дигитални алатки како Railway Infrastructure Asset Management Systems (RI-AMS) овозможуваат интегрирано управување со инфраструктурата преку анализа, предвидување и приоритизација на интервенциите [67]. Со тоа, одржувањето добива стратешка димензија – од реактивна активност се трансформира во управувачки процес кој обезбедува долгорочна одржливост, економска ефикасност и безбеден железнички систем [68].

2.3. Проверка на геометриската состојба на колосекот

Долговечноста на железничката инфраструктура во голема мера зависи од правилниот избор на конструктивни решенија и континуирано следење на нивната состојба. Геометриската стабилност на колосекот претставува клучен предуслов за безбедно, економично и комфортно одвивање на железничкиот сообраќај. Затоа, систематската проверка и мерење на геометриските параметри претставува основа за донесување одлуки поврзани со одржување, реконструкција и продолжување на експлоатациониот век на инфраструктурата [69].

Во рамките на европските стандарди, институциите за управување со железницата се обврзани да вршат редовни мерења и дијагностички тестови на сите елементи на пругата. Целта на овие активности е да се обезбеди објективна проценка на фактичката состојба на инфраструктурата и навремено откривање на потенцијални дефекти. Ваквите мерења се изведуваат со специјализирана опрема која овозможува висока точност и репродуктивност на податоците, согласно секторските технички упатства [70].

Процесот на проверка ги опфаќа основните параметри на геометријата на колосекот: ширина на колосек, надолжен и попречен профил, бочно надвишување, витоперење и насока. Систематското мерење на овие параметри овозможува следење на трендовите на деградација, идентификација на критични делници и планирање на интервенции со поголема прецизност.

Редовниот мониторинг има двоен ефект: го зголемува нивото на безбедност преку рано откривање на дефекти (како пукнатини, деформации и нерамнини), и истовремено ги намалува потребите за итни интервенции и непредвидени трошоци. Со обработка на податоците добиени од мерењата се обезбедува оптимизација на планирањето на одржувањето и минимизирање на прекините во сообраќајот [71].

Современите мерни системи, базирани на автоматизирани коли, видео-надзор и интелигентна анализа на податоци, ја трансформираат проверката на геометријата во интегриран дел од проактивното управување со инфраструктурата. На тој начин, мерењето повеќе не се смета само за инструмент за контрола на безбедноста, туку за стратешки алат што овозможува предвидливо и одржување засновано на податоци на железничките пруги [70, 71].

Со целосно разбирање на процесот на проверка на состојбата, потребно е детално да се разгледа геометријата на колосекот, која претставува основен параметар за дефинирање и проценка на стабилноста, безбедноста и квалитетот на движењето.

2.3.1. Одржување на геометрија на колосек

Геометријата на колосекот претставува основен параметар за стабилност, безбедност и квалитет на движењето во железничкиот систем. Таа се состои од проектирана (номинална) и актуелна геометрија, при што отстапувањата помеѓу нив ги претставуваат неправилностите кои настануваат со текот на времето и под влијание на оптоварувањата, климатските фактори и состојбата на подлогата [72].

Проектираната геометрија се дефинира преку хоризонтална и вертикална проекција. Хоризонталната ја определува трасата на колосекот во рамнината на планот и вклучува правци, кружни и преодни кривини, додека вертикалната го опфаќа надолжниот профил, наклоните, надвишувањето и вертикалните кривини. Овие параметри ја формираат тродимензионалната просторна положба на колосекот и овозможуваат негово прецизно поставување, одржување и обновување.

Во текот на експлоатацијата, геометријата се деградира како резултат на акумулирани деформации во горниот и долниот строј. Овој процес е неизбежен, но преку систематско следење и корекција може да се контролира неговото влијание врз безбедноста и удобноста на возењето. Прецизното мерење и анализа на геометриските параметри претставуваат основа за навремено предвидување и оптимално планирање на интервенции, со цел спречување на сериозни дефекти и несреќи.



Слика 13. Главни оски на координатниот систем на колосекот

Геометријата на колосекот се дефинира преку релативен правоаголен координатен систем центриран во колосекот, со насока на движење согласно стрелките на часовникот:

- X-оска – насока на движење на мерното возило;
- Y-оска – бочна насока паралелна со возната површина;
- Z-оска – нормална насока, насочена надолу.

Во практичниот контекст на мерење и евалуација, посебно значење имаат Упатството 339 и европскиот стандард EN 13848, кои ги утврдуваат критериумите и методите за оценување на геометријата.

Упатство 339 претставува национален документ, наследен од претходните децении кога се донесувале упатства за сите пруги од бившата заедничка железничка компанија - Југословенските железници (ЈЖ), кој ги дефинира унифицираните критериуми за контрола на состојбата на пругите на железничката мрежа. Ова упатство ги опфаќа стандардите и толеранциите за геометриските параметри на колосекот, вклучувајќи ширина на колосекот, витоперење, бочно надвишување, насока и надолжен профил. Важноста на Упатството е во неговата практичност за навремена идентификација на дефекти, што директно влијае врз безбедноста и стабилноста на железничката инфраструктура [73].

Европскиот стандард EN 13848, пак, ги регулира унифицираните параметри и методи за мерење и евалуација на геометријата на колосекот во меѓународен контекст. Овој стандард ги опфаќа сите релевантни параметри и обезбедува јасни насоки за нивно мерење, оценување и управување. Според EN 13848, класификацијата на параметрите за геометријата на колосекот се врши врз основа на категоријата на железничката линија, како што се брзи железници, магистрални и локални линии. Овој пристап овозможува прецизно усогласување на толеранциите со специфичните барања за безбедност и оперативна ефикасност на секоја линија. Следењето и оценувањето на параметрите за геометријата на колосекот согласно овие правилници е суштинско за одржување на железничката инфраструктура, спречување на дефекти и обезбедување на безбедно и ефикасно функционирање на железничкиот сообраќај [74].

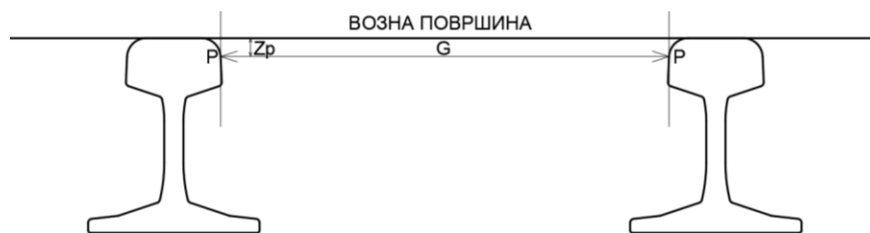
2.3.1.1. Ширина на колосек

Ширината на колосекот претставува еден од најзначајните геометриски параметри на железничката пруга, директно поврзан со стабилноста, безбедноста и динамиката на движење на возилата. Дефектите во ширината на колосекот се манифестираат како отстапувања од стандардната вредност (1435 mm за нормален колосек), што може да предизвика нестабилност, прекумерно абеење на тркалата и шините или, во екстремни случаи, излетување на возот од шините [72].

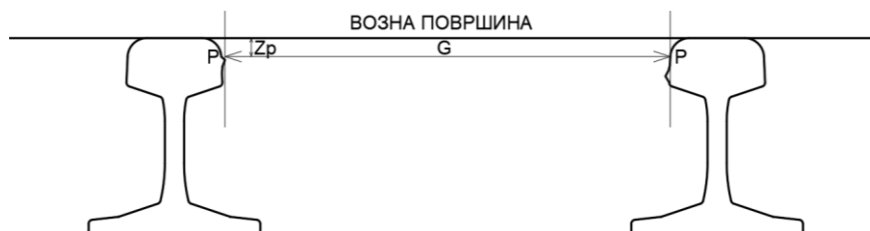
Според CEN стандардите, ширината на колосекот (означена како G) е најкраткото растојание меѓу линиите нормални на возната рамнина што се сечат со главата на шината во точката P, на висина од 14 mm под возната површина [74].

Отстапувањата настануваат под влијание на повеќе фактори – динамички оптоварувања, абеење или олабавување на прицврсниот прибор, нерамномерно слегнување на долниот строј, температурни промени и механички оштетувања [75, 76]. Најчесто се појавуваат два типа дефекти:

- Широк колосек, кога растојанието меѓу шините ја надминува горната граница на толеранција. Ваков дефект доведува до зголемен ризик од излетување на возот од шините.
- Тесен колосек, кога растојанието помеѓу шините е помало од дозволеното. Ваквиот дефект доведува до зголемено абеење на тркалата на возилото и шините.



Слика 14. Ширина на колосек во случај на нови, неизабени шини



Слика 15. Ширина на колосек во случај на избени шини

Идентификацијата на овие дефекти може да се спроведе со рачно мерење (шаблони и механички уреди) или со автоматизирани методи, кои користат ласерски и електронски сензори инсталирани на мерни возила за континуирано снимање и анализа на ширината на колосекот во реално време [77, 78].

Корекцијата се изведува преку затегнување или замена на прицврстните елементи, подбивање и стабилизација на засторот или санација на долниот строј доколку дефектот е резултат на негово слегнување. Редовното следење овозможува рано откривање на неправилностите и одржување на долгорочна стабилност на инфраструктурата [79, 80].

Табела 4. Стандардни вредности и дозволени отстапувања за ширината на колосекот според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74])

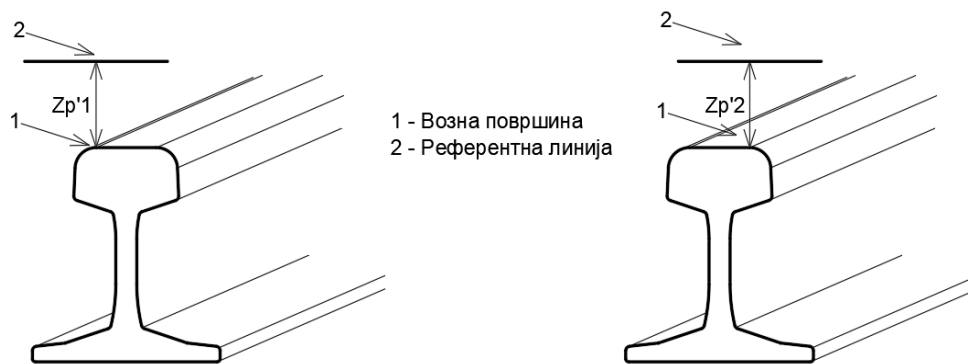
Стандарди и класи	Стандардна ширина на колосекот (mm)	Минимално дозволено (mm)	Максимално дозволено (mm)
Упатство 339	1435	1430	1440
EN 13848: Класа 1 (брзи железници)	1435	1432	1438
EN 13848: Класа 2 (магистрални железнички линии)	1435	1430	1440
EN 13848: Класа 3 (локални железнички линии)	1435	1428	1442

За да се обезбеди унифицирана оценка на состојбата, Упатството 339 и европскиот стандард EN 13848 ги дефинираат стандардните вредности и дозволените отстапувања за ширината на колосекот (Табела 4). Примената на овие документи обезбедува доследност, сигурност и усогласеност со европските технички барања за железничка безбедност.

2.3.1.2. Надолжен профил – стабилност на шина

Надолжниот профил, познат и како стабилност на шина, го претставува вертикалниот распоред на шините долж трасата и е клучен параметар за безбедноста и комфорот на железничкиот сообраќај. Секоја неправилност во овој профил се манифестира како отстапување на висината на шината од проектираната траекторија, што предизвикува

неравномерни динамички оптоварувања, зголемени напрегања и абење на инфраструктурата [72].



Слика 16. Надолжен профил (стабилност)

Стабилноста на шината ја опишува нејзината способност да ја одржи предвидената геометрија под влијание на оптоварувања и надворешни фактори. Дефект во надолжниот профил претставува разлика меѓу висинските положби на последователни точки на шината, пресметана како отстапување од референтната линија на одреден распон на бранови должини [72].

Причините за појава на неправилности најчесто се поврзани со неравномерно слегнување на долниот строј, некавалитетно подбивање, температурни дилатации, прекумерни динамички оптоварувања или конструктивни грешки при поставување на колосекот. Последиците се зголемени вертикални вибрации, неравномерен контакт меѓу тркалото и шината, забрзано абење и намален комфорт и безбедност при возење [81, 82].

Идентификацијата на дефектите во надолжниот профил се изведува преку прецизни мерни техники. Традиционалните методи користат нивелири или механички шаблони, додека современите автоматизирани системи применуваат ласерски и инерцијални сензори инсталирани на мерни возила. Овие системи овозможуваат континуирано снимање и анализа на висинските отстапувања во реално време, како и оценка на нивното влијание преку динамичко однесување на возилата [50, 83].

Корекцијата на дефектите се врши со подбивање и стабилизација на засторот, санација на долниот строј или замена на деформирани елементи (шини, прагови). Превентивното следење и навремената интервенција се клучни за одржување на долгорочната стабилност и минимизирање на ризиците [83].

Според Упатството 339 и европскиот стандард EN 13848, дозволените отстапувања во надолжниот профил зависат од класата на железничката линија (Табела 5). Овие документи овозможуваат унифицирана проценка на состојбата и обезбедуваат техничка усогласеност со европските критериуми за безбедност и квалитет. Дозволените отстапувања согласно Упатство 339 и Европскиот стандард EN 13848 се прикажани во Табела 5.

Кај мерењата на стабилност (надолжната положба на шината), предзнаците „+“ и „-“ се користат за означување на отстапувањата од идеалната положба на шините долж надолжниот профил на колосекот:

- Позитивен предзнак („+“): Означува дека точката на шината се наоѓа над идеалната линија (или теоретската референтна линија). Причини можат да бидат премногу збиен застор, геолошки аномалии или температурни дилатации.

- Негативен предзнак („–“): Означува дека точката на шината се наоѓа под идеалната линија. Причини можат да бидат слегнување на подлогата, оштетување на праговите или нестабилност на теренот.
- Нула („0“): Означува идеално ниво без отстапувања.

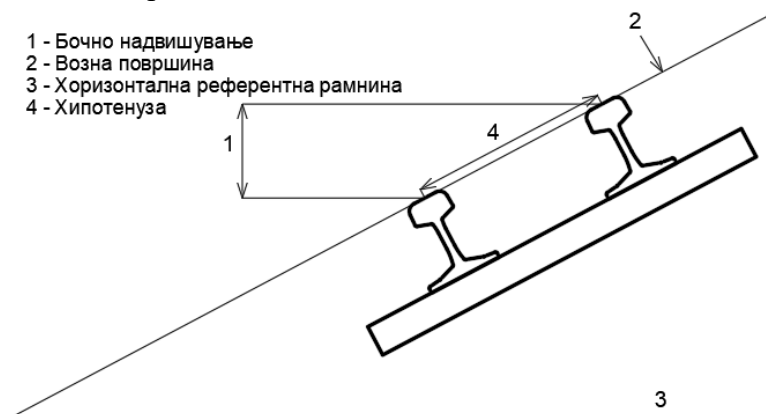
Табела 5. Дозволените отстапувања за надолжен профил – стабилност на шина според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74])

Стандарди и класи	Минимално дозволено (mm)	Максимално дозволено (mm)
Упатство 339	2 mm на 10 метри должина	5 mm на 10 метри должина
EN 13848: Класа 1 (брзи железници)	-	± 2 mm на 10 метри должина
EN 13848: Класа 2 (магистрални железнички линии)	-	± 3 mm на 10 метри должина
EN 13848: Класа 3 (локални железнички линии)	-	± 4 mm на 10 метри должина

Позитивните и негативните отстапувања претставуваат важни показатели за процена на состојбата на шините, бидејќи овозможуваат навремена дијагностика на неправилности и дефинирање на насоки за нивна корекција и одржување [79].

2.3.1.3. Бочно надвишување

Бочното надвишување претставува висинска разлика меѓу возните површини на левата и десната шина, кое се пресметува според аголот формиран меѓу возната површина и хоризонталната референтна рамнина. Оваа висинска разлика ја претставува вертикалната страна на правоаголен триаголник чија хипотенуза одговара на номиналната ширина на колосекот, зголемена за ширината на главата на шината [72].



Слика 17. Бочно надвишување

Во зависност од ширината на колосекот, должината на хипотенузата изнесува приближно:

- 1500 mm за стандардна ширина (1435 mm),
- 1600 mm за ширина од 1524 mm и
- 1740 mm за ширина од 1668 mm.

Дефект во бочното надвишување се јавува кога разликата во висината меѓу шините не е во согласност со пропишаните толеранции, најчесто како резултат на неправилно подбивање, слегнување на долниот строј, абење на шините или долгорочно динамичко оптоварување [79].

Неправилностите во бочното надвишување имаат повеќекратни последици: намалена стабилност на возилата, зголемено абеење на тркалата и шините, појава на вибрации и бучава, како и потенцијални оштетувања на инфраструктурата поради нерамномерна распределба на оптоварувањата [79, 84].

Контролата на бочното надвишување се врши со рачни и автоматизирани методи. Рачните мерења користат нивелири и шаблони за проверка на висинската разлика, додека современите мерни возила применуваат инерцијални и ласерски сензори за континуирано снимање и анализа [79].

Корективните активности вклучуваат регулација на подбивањето и стабилизација на засторот, санација на долниот строј или замена на изабени шини. Превентивното следење и навремената интервенција се од суштинско значење за одржување на геометријата и безбедноста на колосекот.

Според Упатството 339 и европскиот стандард EN 13848, дозволените вредности за бочното надвишување се прикажани во табела 6.

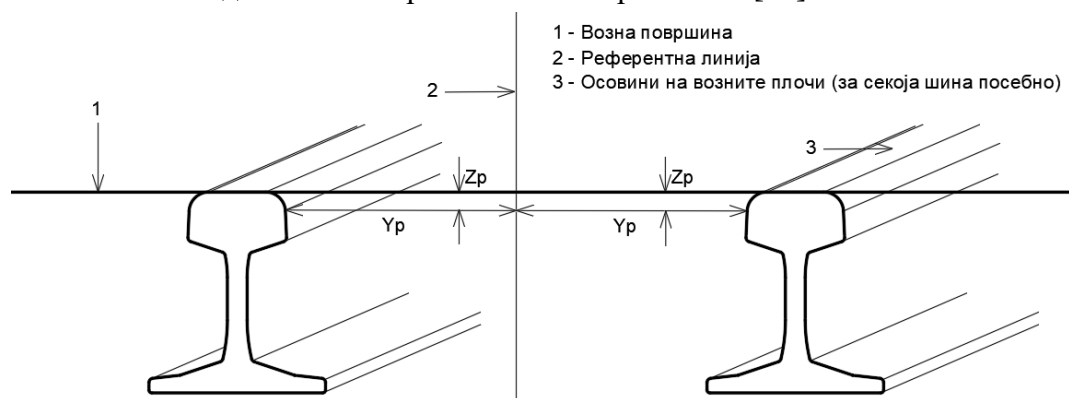
Табела 6. Дозволен максимални и минимални вредности за бочното надвишување според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74])

Стандарди	Минимално потребно бочно надвишување (mm)	Максимално дозволено бочно надвишување (mm)
Упатство 339	100	160
EN 13848	90	180

Овие граници се утврдени за да обезбедат стабилно и безбедно движење на возилата во кривини, земајќи ги предвид динамичките сили, осовинските оптоварувања и комфорот при возење.

2.3.1.4. Хоризонтална геометрија на шина и колосек (“смер/насока”)

Хоризонталната геометрија на колосекот, позната и како смер или насока, ја опишува положбата на шините во хоризонталната рамнина. Таа претставува основен параметар за стабилност и безбедност на движењето, бидејќи од неа зависи непреченото водење на возилата и динамичката рамнотежа во кривините [72].



Слика 18. Хоризонтална геометрија на шина и колосек

Неправилностите во насоката се јавуваат во две основни форми:

- Во кривини: отстапувања од предвидениот радиус или неправилна форма на преодни кривини;
- На делници во правец: локални хоризонтални отклонувања што влијаат на стабилноста и рамномерноста на движењето.

Главни причини за појава на дефекти се несоодветно одржување на засторот и долниот строј, слегнувања на теренот, термички деформации на шините и високи динамички оптоварувања.

Последиците од неправилна хоризонтална геометрија се зголемено абеење на тркалата и шините, намалена стабилност на возилата во кривини, повисоки нивоа на вибрации и бучава, како и зголемен ризик од изместување на возилата од колосекот.

Мерењата се изведуваат рачно или автоматизирано. Рачните инструменти (жици за правец и шаблони за девијации) овозможуваат локално мерење, додека автоматизираниите системи користат ласерски и инерцијални технологии вградени во мерни возила за континуирано снимање на насоката.

Корекцијата се врши со подбивање и стабилизирање на засторот, регулирање на кривините со соодветни радиуси и преодни делови, како и санација на долниот строј при деформации предизвикани од слегнување [85].

Според Упатство 339 и европскиот стандард EN 13848, дозволените вредности за отстапување на смер/насока се прикажани во табела 7.

Табела 7. Дозволените максимални вредности за отстапување на смер/насока на колосек според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74])

Стандарди	Максимално дозволено отстапување
Упатство 339	± 5 mm на 10 метри должина
EN 13848: Брзи железници	± 2 mm на 10 метри должина
EN 13848: Магистрални линии	± 3 mm на 10 метри должина
EN 13848: Локални линии	± 4 mm на 10 метри должина

Во мерењата на хоризонталната геометрија на смер/насока на железнички колосек, предзнаците "+" и "-" означуваат следното:

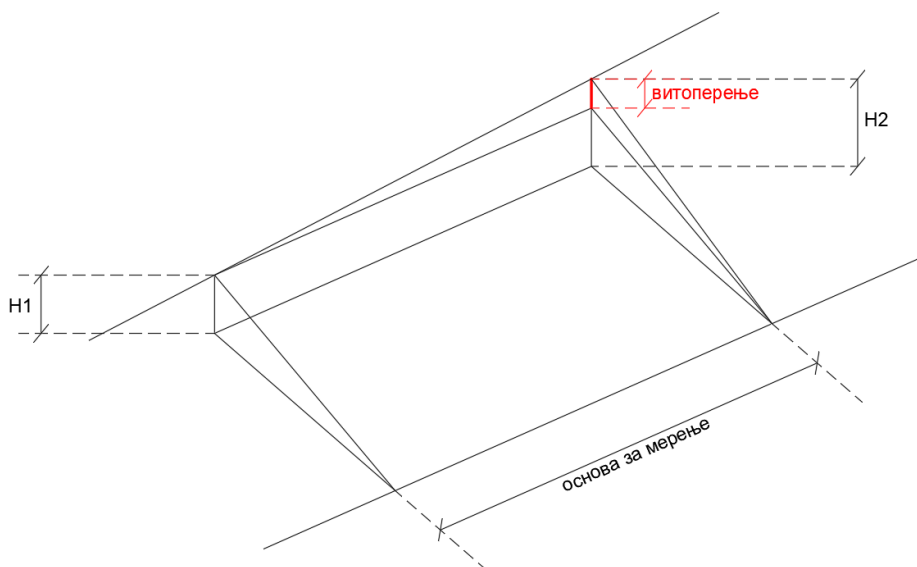
- Позитивен предзнак („+“): девијација кон десната страна од референтната оска.
- Негативен предзнак („-“): девијација кон левата страна од референтната оска.
- Наизменични „+“ и „-“ периодични отклонувања со синусоидален карактер (влечење лево – десно) [84, 85].

2.3.1.5. Витоперење

Витоперењето претставува параметар што ја опишува торзионата нерамномерност на шините во попречна рамнина, односно искривувањето на колосекот при што едната шина е поставена повисоко или пониско од другата. Овој параметар е суштински за одржување на попречната стабилност на колосекот и безбедното водење на возилата при големи брзини и во кривини.

По дефиниција витоперењето претставува разлика во висината помеѓу левата и десната шина, изразена во милиметри, измерена на одредена основа (најчесто 2 m или 10 m во зависност од применетиот стандард) [72]. Главни причини за појава на дефекти во витоперењето се:

- деформација или нерамномерно слегнување на засторот и подлогата,
- неправилно поставување на шините при монтажа,
- абеење на шините или оштетување на праговите,
- нерамномерно или променливо оптоварување од возилата,
- деградација на долниот строј поради проблеми со одводнување.



Слика 19. Витоперење на колосек

Последиците од прекумерно витоперење можат да бидат значајни: намалена стабилност на возилото, појава на вибрации и нерамномерен контакт тркало–шина, зголемено абење на конструктивните елементи и во екстремни случаи — изместување на возилото од шините [75].

Мерењето на витоперењето може да се изведе на следниот начин:

- рачно, со шаблони за висина и нивелири, или
- автоматизирано, со мерни коли опремени со ласерски и инерцијални сензори кои овозможуваат континуирано мерење и анализа во реално време [86].

Корективните активности вклучуваат подбивање и стабилизација на засторот, санација на долниот строј, или замена на оштетени елементи (шини, прагови). Редовното следење и мерење е неопходно за навремено препознавање на промени во попречната геометрија и спречување на нарушувања во стабилноста [76].

Според Упатство 339 и европскиот стандард EN 13848, дозволените вредности за витоперењето се прикажани во табела 8.

При мерење на витоперењето, предзнаците се користат за означување на насоката на искривување:

- „+” – шината е повисоко поставена во однос на референтната линија,
- „-” – шината е пониско поставена,
- наизменични „+“ и „-” – циклични (синусоидални) промени во рамнината.

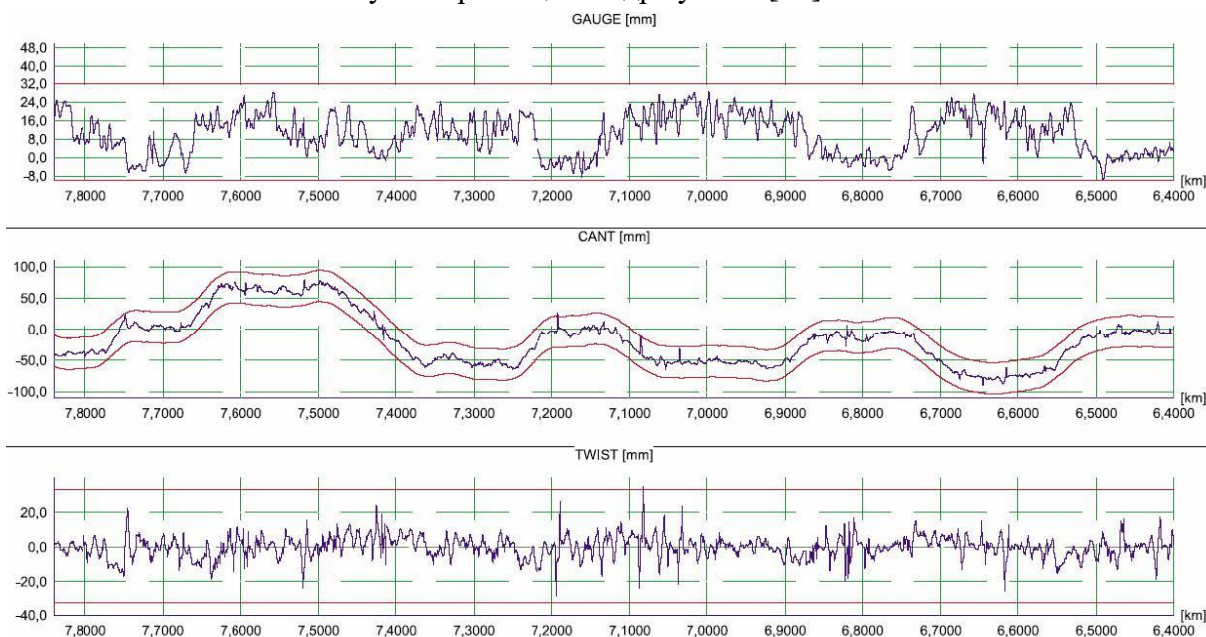
Табела 8. Максимално дозволено витоперење според Упатството 339 и Европскиот стандард EN 13848 (Извор: [73, 74])

Стандарди	Референтна должина	Максимално дозволено витоперење
Упатство 339	2 m	6 mm
EN 13848: Брзи железници	3 m	7 mm
EN 13848: Магистрални линии	3 m	8 mm
EN 13848: Локални линии	3 m	10 mm

Овие вредности се користат при моделирање на динамичкото однесување на возилата и инфраструктурата, овозможувајќи анализа на стабилноста и процена на долгорочните ефекти од деградацијата на подлогата [75].

2.3.2. Начини за мерење на параметрите на геометријата на колосекот

Геометријата на колосекот претставува еден од најзначајните индикатори за состојбата и стабилноста на железничката инфраструктура. Нејзиното систематско следење е предуслов за безбедно и економично функционирање на транспортниот систем, бидејќи секое нарушување во геометријата влијае директно врз динамиката на движење на возилата и врз животниот век на сите компоненти од горниот и долниот строј. Колосек со лоша геометрија покажува забрзано пропаѓање, повисока фреквенција на дефекти и зголемен ризик од излетување на возилата од шините. Наспроти тоа, колосек со стабилна и прецизна одржувана геометрија овозможува поголема експлоатациона брзина, подолг век на траење на елементите и пониски вкупни трошоци за одржување [87].



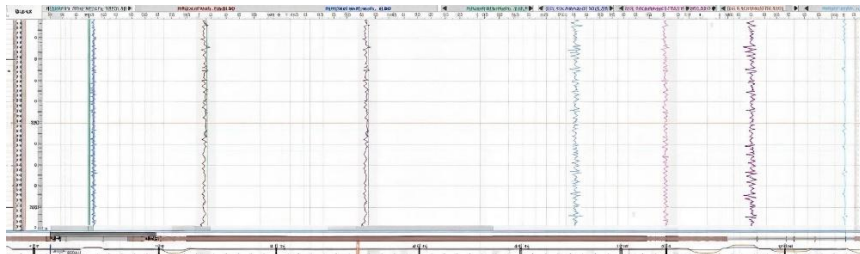
Слика 20. Графички приказ на измерени дефекти за ширина на колосек, надвишување и витоперење

Современите системи за мерење на геометријата на колосекот се развиени со цел да обезбедат континуирано и високо прецизно следење на состојбата на трасата. Тие користат комбинација на ласерски, инерцијални и оптички сензори, акцелерометри и камери со висока резолуција за мерење на основните параметри, ширина на колосек, надолжен профил, бочно надвишување, витоперење и насока на колосекот. Примената на овие технологии овозможува прибирање на податоци во реално време, со што се овозможува рано откривање на неправилности, анализа на трендови и планирање на навремени интервенции [9].

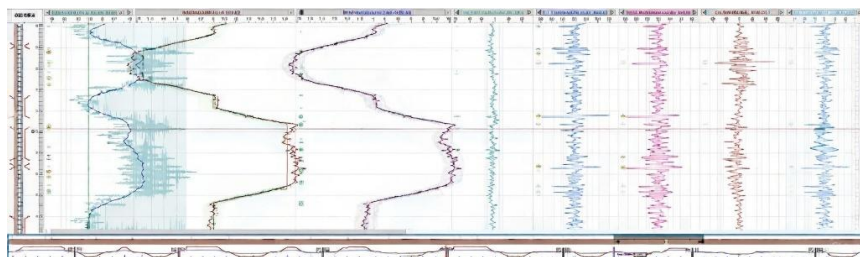
Мерењата најчесто се изведуваат со специјализирани мерни коли, кои претставуваат технолошки напредни возила опремени со инструменти за автоматизирано снимање, позиционирање и анализа на геометријата на трасата. Податоците добиени од овие коли се прикажуваат во графичка и нумеричка форма, што овозможува сеопфатна процена на состојбата. Графичките извештаи визуелно ја прикажуваат варијацијата на параметрите по должина на трасата, додека нумеричките извештаи обезбедуваат детална табеларна

документација со точни координати, вредности, толеранции и препораки за интервенции [80].

Графичките дијаграми се особено корисни за визуелно препознавање на критични точки на трасата. Кај делници со стабилна геометрија (Слика 21) дијаграмите покажуваат рамномерни и ниски амплитуди, што означува урамнотежени параметри на колосекот. Кај делници со деградирана геометрија (Слика 22), пак, се јавуваат високи пикови кои го сигнализираат присуството на сериозни дефекти што бараат итна интервенција. Ваквите извештаи овозможуваат техничките служби брзо да ги идентификуваат зоните на нестабилност и да го насочат одржувањето таму каде што е најпотребно.

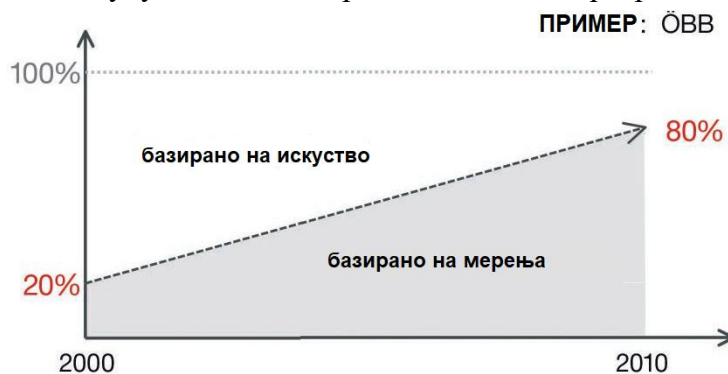


Слика 21. Приказ на добра геометрија на колосек и репрезентативен дијаграм



Слика 22. Приказ на лоша геометрија на колосек и репрезентативен дијаграм

Нумеричките извештаи, пак, имаат суштинска улога во техничкото документирање и планирање на активностите за одржување. Преку табеларна презентација, тие овозможуваат детален преглед на измерените вредности и нивна споредба со стандардизираните толеранции, при што зоните со надминати гранични вредности се автоматски означуваат како критични. На тој начин, нумеричките податоци служат како основа за приоритизација на интервенциите, каде што итно се третираат зоните со повисок ризик, а останатите се вклучуваат во планираните годишни програми за одржување.



Слика 23. Влијанието на технологијата за снимање на одржувањето на ÖBB (Извор: [88])

Значењето на систематското мерење и анализа на геометријата најдобро се согледува преку практичниот пример на Австриските федерални железници (ÖBB). Во почетокот на

2000-тите, околу 80% од одлуките за одржување биле базирани на субјективни проценки и искуство на теренските инспектори, а само 20% врз основа на измерени податоци. До 2010 година, со воведување на модерни мерни коли и системи за автоматска анализа, овој сооднос бил обратен — 80% од одлуките биле засновани на објективни мерења (Слика 23). Овој премин резултирал со значително намалување на фреквенцијата на дефекти на шините и со редукција на бројот на привремени ограничувања на брзината [88].

Бидејќи железничката инфраструктура претставува комплексен систем составен од повеќе потсистеми (колосек, контактна мрежа, сигнално-безбедносни и енергетски системи), се препорачува мерењата на параметрите значајни за одржување да се изведуваат истовремено, користејќи единствена мерна кола. На овој начин се овозможува корелација меѓу дефектите на различни потсистеми, нивна заедничка анализа и поцелосно разбирање на меѓусебните влијанија, што е основа за интегрирано управување со железничката инфраструктура [49, 63].

- Поделба на системите за мерење на геометријата на колосекот

Системите за мерење на геометријата на колосекот може да се класифицираат според технологијата, структурата на системската понуда и областа на примена [125].

Од технолошки аспект, мерењата најчесто се изведуваат преку ласерски, инерцијални, визуелни и позициони системи. Ласерските системи најчесто се безконтактни и користат оптичко-електронски сензори кои со висока прецизност ја определуваат положбата на шините при различни брзини на движење. Инерцијалните системи се засноваат на акцелерометри, инклинометри и жироскопи, со што се овозможува мерење на вертикалните и попречните промени на колосекот и особено точна проценка на витоперењето и надвишувањето. Визуелните системи користат камери и алгоритми за машинска визија кои овозможуваат автоматска идентификација и квантитативна анализа на дефекти, додека позиционите системи, базирани на GNSS/GPS, обезбедуваат геореференцирање на податоците, овозможувајќи споредба на мерењата низ време и простор [89, 90].

Од аспект на системската структура, ваквите решенија најчесто опфаќаат хардверски, софтверски и сервисен сегмент. Хардверот ги вклучува сензорите, мерните осовини и единиците за прибирање податоци, додека софтверот е наменет за обработка, визуелизација и автоматско генерирање на извештаи. Сервисниот сегмент се однесува на активности како инсталација, калибрација, одржување и обука на операторите [84].

Во поглед на намената, системите можат да бидат дизајнирани за рутинска инспекција, откривање на дефекти, планирање на одржувањето или за континуирано следење на безбедносната усогласеност. Рутинските системи се користат за редовно следење и превентивно одржување, додека специјализираните системи за детекција на дефекти вршат насочено снимање на параметрите на хоризонталната и вертикалната геометрија, ширината на колосекот и витоперењето. Системите за планирање овозможуваат генерирање на аналитички извештаи засновани на реални мерења, што овозможува приоритизација на интервенциите и оптимизација на трошоците, а системите наменети за безбедност се користат за проверка на усогласеноста со националните и европските стандарди [79].

Историски гледано, првите мерни системи се базирале на контактни механички принципи, при кои мерните тркала или сензори биле во директен допир со шините. Иако овие методи овозможувале релативно едноставно мерење, честопати се соочувале со

проблеми како абее на мерните компоненти, губење на прецизноста и ризик од оштетување на уредите при големи брзини или вибрации [88, 90]. Денес, овие решенија се заменети со безконтактни технологии, пред сè со оптичко-електронски и инерцијални системи, кои обезбедуваат висока точност и стабилност на мерењето при сите експлоатациони услови, без физички контакт со шините и без потреба од честа калибрација.

Мерењето на геометријата на колосекот е предмет на стандардизација од страна на Европскиот комитет за стандардизација (CEN), преку техничката комисија TC 256 и работната група WG 28. Резултатот од оваа активност е европскиот стандард EN 13848 – Railway applications: Track geometry quality, кој дефинира параметри, методи и критериуми за мерење и евалуација на геометријата [74]. Во рамките на стандардот се опфатени параметрите ширина на колосек, надолжен профил (стабилност), хоризонтална насока (смер), бочно надвишување и витоперење, како и препорачаните методи на мерење. Притоа, контактните и безконтактните техники се применуваат во зависност од условите на теренот и намената на мерењето, додека инерцијалните системи најчесто се користат за процена на надвишувањето и витоперењето на шини при динамички услови.

Современите системи за мерење се интегрирани и овозможуваат истовремено снимање на геометријата на колосекот и профилот на шината. Параметрите на колосекот се добиваат преку мерење на внатрешниот профил на шините со ласерски зраци и специјализирани камери, при што на секои 25 cm се генерира по еден попречен профил. На овој начин, системот ја пресметува ширината на колосекот, хоризонталната и вертикалната геометрија и надвишувањето, а податоците се прецизно референцирани во однос на осовината на колосекот. Комбинирањето на овие мерења со инерцијални податоци овозможува целосна реконструкција на просторната форма на трасата и обезбедува висока прецизност при различни брзини на движење – од 0 до 300 km/h [75, 91].

Предноста на интегрираното мерење лежи во можноста за вкрстена анализа и корелација меѓу различните параметри. Преку поврзување на податоците за геометријата со оние за профилот на шините, наборите, вертикалните забрзувања или силите во контактот тркало-шина, може да се идентификуваат причинско-последичните врски меѓу различните дефекти, како на пример проширување на колосекот предизвикано од прекумерно абее на шините или недоволно прицврстување на приборот. Таквиот пристап овозможува подлабоко разбирање на механизмите на деградација и поефикасно планирање на санациите [76].

Во последните години, системите за мерење на геометријата бележат забрзан технолошки напредок, поттикнат од интеграцијата со интернет-на-нештата (IoT), анализа на големи податоци и вештачка интелигенција. Овие решенија овозможуваат далечинско следење, предиктивна анализа и автономна инспекција на пругите, без прекин на сообраќајот и со минимален човечки ангажман. Паралелно, се развиваат и зелени технологии и енергетски ефикасни системи кои ги намалуваат емисиите на јаглерод диоксид на железничките операции.

Современиот пазар на вакви технологии покажува дека системите за мерење на геометријата на колосекот постепено се трансформираат од дијагностички алати во интелигентни системи за управување со инфраструктурата, кои обезбедуваат континуирано следење, анализа и оптимизација на состојбата на колосекот. Тие денес претставуваат суштински дел од дигиталната трансформација на железничкиот сектор и имаат централна улога во осигурување на безбедност, доверливост и долгорочна одржливост на пругите.

2.4. Управување со железничката инфраструктура

Континуираното мерење и анализа на геометријата на колосекот претставуваат основа за ефикасно управување со железничката инфраструктура. Добиените податоци овозможуваат систематско планирање на активности за одржување, приоритизација на интервенции и долгорочно управување со квалитетот на пругата. Во тој контекст, управувањето со инфраструктурата не се ограничува само на технички аспекти, туку опфаќа и организациони, правни и економски процеси кои обезбедуваат безбедно и одржливо функционирање на железничкиот систем [75].

Управувањето со железничката инфраструктура претставува сложен системски процес кој ги опфаќа сите активности поврзани со изградбата, реконструкцијата, одржувањето и модернизацијата на железничките објекти и системи. Според Законот за железничкиот систем [34], управувањето ги вклучува и организацијата на железничкиот сообраќај, регулирањето на капацитетите и обезбедувањето на безбедни и сигурни услови за експлоатација. Овие функции ги врши управител на инфраструктурата – јавно, домашно или странско правно лице кое поседува дозвола за управување со железничката инфраструктура или нејзин дел.

Управителот на инфраструктурата има централна улога во системот на железничкото управување. Неговите основни задачи опфаќаат организирање и регулирање на железничкиот сообраќај, распределба на инфраструктурните капацитети, изработка на возен ред, како и планирање и изведување на активности за изградба, реконструкција, ремонт и заштита на инфраструктурата. Дополнително, управителот врши постојана контрола врз безбедноста и сигурноста на сообраќајот, одржувањето на инфраструктурните потсистеми и заштитата на животната средина [84].

Железничката инфраструктура претставува сложен систем составен од повеќе потсистеми, колосек, долен строј, сигнализација, енергетски, комуникациски и контролни уреди, кои мора да функционираат усогласено. Управувањето со ваков систем бара интегриран пристап кој комбинира инженерски, економски и организациони аспекти. Одлуките што се донесуваат во рамки на управувањето имаат долгорочни последици врз стабилноста, безбедноста и економичноста на системот [75].

Клучните функции на управувањето со железничката инфраструктура опфаќаат неколку меѓусебно поврзани области [131]:

- Планирање и развој на инфраструктурата: дефинирање на долгорочни стратегии за изградба, модернизација и проширување на мрежата, анализирање на транспортните потреби и капацитетите, како и утврдување на приоритетите за инвестиции.
- Мониторинг и дијагностика на состојбата: континуирано следење на состојбата на колосекот, мостовите, тунелите и сигнализацијата со примена на автоматизирани системи за мерење и обработка на податоци.
- Одржување на инфраструктурата: вклучува редовно, превентивно и корективно одржување со цел навремено откривање и санација на дефекти, како и обезбедување стабилна и сигурна геометрија на колосекот.
- Оптимизација на ресурсите: рационално користење на човечки, материјални и финансиски ресурси со цел намалување на трошоците и максимална достапност на инфраструктурата.

- Управување со ризици: идентификација и процена на ризици (технички, природни, оперативни), развивање на планови за справување со итни ситуации и воведување на системи за контрола на ризикот.
- Усогласување со стандарди и прописи: примена на европските стандарди (EN 13848 и поврзани нормативи) и национални регулативи што го дефинираат квалитетот на инфраструктурата и условите за нејзино безбедно користење [75, 84].

Современото управување со железничката инфраструктура се потпира на примена на напредни технологии кои овозможуваат дигитализација, автоматизација и предиктивна анализа. Преку интеграција на интелигентни транспортни системи (ITS), сензори и IoT технологии, се обезбедува собирање на податоци во реално време за состојбата на инфраструктурата и навремено откривање на дефекти. Специјализираните софтверски платформи овозможуваат анализа на добиените податоци, планирање на активности за одржување и приоритизација на интервенции според нивната критичност [78].

Дополнително, примената на технологии за анализа на големи податоци (Big Data) овозможува обработка на огромен број мерења и инспекциски резултати, идентификување на трендови и развој на предиктивни модели за појава на дефекти [92]. Со ова пристапот кон управување се префрла од реактивен кон превентивен, што значително ја зголемува ефикасноста и го продолжува животниот век на инфраструктурата.

Модернизацијата на железничката инфраструктура, особено во контекст на брзите железници, бара постојано усовршување на геометријата на колосекот, примена на нови материјали со поголема трајност и унапредување на системите за сигнализација и контрола. Овие активности обезбедуваат повисоки стандарди на безбедност, стабилност и енергетска ефикасност [41].

На тој начин, управувањето со железничката инфраструктура претставува основен столб на современиот железнички систем. Со примената на научно базирани методи, современи технологии и интегрирани стратегии, овој процес овозможува сигурно, економично и одржливо функционирање на железничката мрежа, при што се задоволуваат и техничките и економските критериуми на системот.

3. ЖЕЛЕЗНИЦАТА ВО ЦРНА ГОРА

Развојот на железничкиот сообраќај во Црна Гора започнал на почетокот на XX век. Првата железничка линија на територијата на денешна Црна Гора е пуштена во сообраќај во 1901 година на делницата Габела–Хум–Ускопље–Херцег Нови–Зеленика, во должина од 11 km. Линијата претставувала дел од австроунгарската мрежа и била наменета за поврзување на приморјето со внатрешноста на државата. Во 1908 година е пуштена во работа пругата Бар–Вирпазар (43 km), со тесен колосек (0.75 m), со што е воспоставен првиот домашен железнички систем кој ги поврзувал морското и езерското пристаниште [93].

Во следните децении железничката мрежа постепено се проширувала. Во 1927 година е изградена линијата Подгорица–Доња Плавница, а во 1938 година е пуштена во работа пругата Требиње–Билеќа–Никшиќ. Поради Втората светска војна, нејзиното продолжување кон Подгорица било одложено, но по војната, со интензивна градба, делницата е завршена за само 15 месеци. Во 2012 година оваа линија е целосно електрифицирана [93].

Средината на педесеттите години го означува почетокот на изградбата на првата железничка линија со нормален колосек, Титоград–Бар, со најсложен дел кај тунелот Созина (6.2 km). Со нејзиното отворање, времето на патување е скратено од осум на еден час. Во 1976 година е пуштена во сообраќај меѓународната пруга Белград–Бар, која и денес претставува основен железнички коридор во државата. Последната изградена пруга во Црна Гора е Подгорица–Скадар (1986), која денес се користи само за товарен сообраќај [93].

Железничката инфраструктура во Црна Гора е во државна сопственост и со неа управува Железничка инфраструктура Црне Горе (ŽICG). Вкупната должина на мрежата изнесува 327.72 km, од кои 250.51 km се отворена пруга, а 77.21 km се станични колосеци. Од вкупната должина, 223.80 km се електрифицирани со монофазен систем 25 kV, 50 Hz, а 24.74 km се неелектрифицирани [94].

Густината на железничката мрежа е 18.4 m пруга/km², односно 0.40 km/1000 жители, што укажува на релативно ниска покриеност на територијата со железничка инфраструктура. Ограничувачки фактори се сложениот релјеф, високите инвестициски трошоци и зголемените барања за одржување. Сите пруги се едноколосечни и со изразени геометриски ограничувања кои влијаат на експлоатационите перформанси.

Железничката мрежа е поделена на три главни правци (Слика 24):

1. Железничка пруга Врбница (Државна граница со Србија) - Бар

Пругата е дел од меѓународната линија Белград–Бар (рута 4 според SEETO) и има вкупна должина од 169.21 km. Таа е целосно електрифицирана и пуштена во сообраќај во 1976 година. Карактеристична е по тоа што околу 40% од трасата се состои од објекти (108 мостови, 106 тунели, 372 пропусти). Минималниот радиус на кривина е $R_{min} = 300$ m, а максималниот надолжен наклон $i_{max} = 25\%$. Пругата вклучува 9 станици, 8 вкрсници и 19 постојки.

Во периодот 2006–2019 година, извршен е ремонт на делот од државната граница до Требешица, со што е зголемена брзината од 50 на 80 km/h. На преостанатите 95.65 km, поради состојбата на горниот строј и активни свлечишта, брзината варира меѓу 30–70 km/h. Со целосна санација на косините и реконструкција, можно е зголемување на брзината до 100 km/h. Поради својата конфигурација, оваа пруга е меѓу најтешките за одржување во

Европа, но претставува и најзначајна транспортна оска за економијата на Црна Гора, обезбедувајќи директна врска меѓу пристаништето Бар и внатрешноста на Балканот [94].



Слика 24. Железничка мрежа на територијата на Црна Гора, Извор: Nacionalni program željezničke infrastrukture 2021-2023 [94]

2. Железничка пруга Никшиќ – Подгорица

Линијата е долга 56.60 km и првично била со тесен колосек. Во 2006 година е извршен сеопфатен ремонт со замена на горниот строј, санација на тунели и мостови, реконструкција на сигнално-сигурносни уреди и електрификација. Денес, оваа пруга е проектирана за брзини до 75–100 km/h, а моментално дозволените брзини се 75 km/h (Никшиќ–Даниловград) и 60 km/h (Даниловград–Подгорица). Постојат 9 мостови, 12 тунели и 45 пропусти, со минимален радиус на кривина од 300 m и максимален надолжен наклон од 25‰ [94].

3. Железничка пруга Подгорица – државна граница со Албанија

Оваа линија, долга 24.70 km, претставува дел од меѓународниот правец Подгорица–Скадар (рута 2 според SEETO). Пругата не е електрифицирана и има 5 мостови, 3 тунели и 24 пропусти, со минимален радиус на кривина од 300 m и максимален надолжен наклон од 7.2‰. Моменталната максимална брзина е 70 km/h до станицата Тузи и 50 km/h до државната граница. Од 1992 до 2002 година пругата била затворена за сообраќај, а денес ја користат само товарни возови [94]. Железничката пруга Врбница – Бар, како дел од меѓународната железница Белград – Бар, е препознаена како основа на железничкиот инфраструктурен систем во Црна Гора и главна транзитна рута што го поврзува пристаништето Бар со внатрешноста. Другите две пруги, Подгорица - државна граница со Албанија, како дел од меѓународната железница Подгорица - Скадар, односно регионалната железница Никшиќ - Подгорица, се директно поврзани со железничката пруга Белград - Бар и претставуваат единствена железничка врска на Албанија со регионот и Европа, односно поврзуваат важни економски центри во Црна Гора.

Железничката мрежа на Црна Гора е компактна, со ограничен капацитет и сложен терен, но има клучна улога во меѓународниот товарен транспорт и во економската поврзаност со регионот. Линијата Врбница–Бар, како дел од коридорот Белград–Бар, претставува основа на железничкиот систем и предмет на најголем дел од истражувањата за одржување и деградација на колосекот.

3.1. Железничка пруга Врбница (Државна граница со Србија) – Бар

Железничката пруга Врбница – Бар претставува најзначајната железничка линија во Црна Гора и основен дел од меѓународната пруга Белград – Бар, означена како рута 4 во SEETO мрежата. Таа ја поврзува Црна Гора со европската железничка мрежа преку Србија и има стратешко значење за државната економија, бидејќи преку пристаништето Бар овозможува директен извоз и увоз кон земјите од Централна Европа и поврзување со трансевропските коридори VII и X (Слика 25). Вкупната должина на пругата изнесува 476 km, од кои 167,1 km се наоѓаат на територијата на Црна Гора, додека остатокот минува низ Србија и мал дел низ Босна и Херцеговина [95].

Со оглед на нејзината положба, оваа линија е единствената копнена железничка врска на Црна Гора со остатокот од европската железничка мрежа и претставува главен надворешен генератор на патнички и товарни текови. Линијата овозможува поврзување на пристаништето Бар со економиите на Србија и Централна Европа, а со тоа и со Дунав и мрежата на европските пристаништа.

Пругата е едноколосечна, целосно електрифицирана и наменета за мешовит сообраќај, со изразени карактеристики на планинска траса. Комплексноста на релјефот и големата висинска разлика меѓу најниската точка во Бар (12 m н.в.) и највисоката во

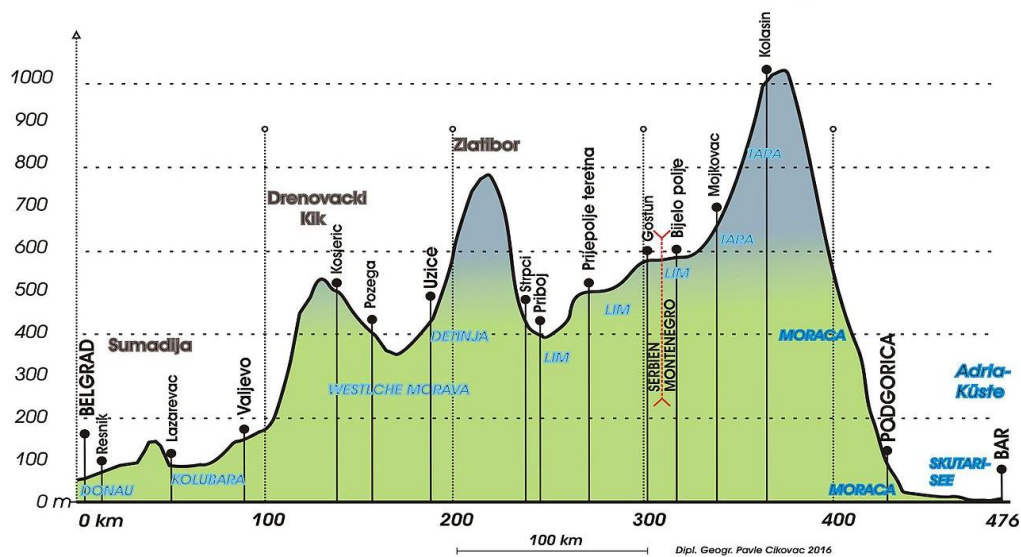
Колашин (1032 m н.в.) ја прават оваа линија една од технички најсложените железници во Европа. На целокупната пруга Белград – Бар се изградени 254 тунели со вкупна должина од околу 114 km, што претставува речиси една четвртина од вкупната должина на трасата. Од тоа, на територијата на Црна Гора се наоѓаат 102 тунели со должина од приближно 44 km, како и 96 мостови со должина од 7,74 km, 9 галерии и 291 пропуст [95].



Слика 25. Пруга Белград – Бар, Извор: Beograd – Bar (monografija), urednik: Dragoljub Golubović (Novinsko izdavačko poduzeće Duga, Beograd 1972.)

Пругата Блеград – Бар има карактеристики на рамничарска и планинска пруга. Најголемите надолжни наклони се 13‰ на делницата од Белград до Ужице, 17‰ на делницата од Ужице до Прибој и 25‰ на делницата од Бијело Поље до Подгорица [95].

Највисоката кота на пругата е во Колашин на 1032m надморска височина, а најниската кота на пругата е во Бар на 12m надморска височина. Околу 44% од железничката пруга се состои од т.н вештачки објекти [96].



Слика 26. Надолжен профил на пругата Белград – Бар, Извор:
https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDeljezni%C4%8Dka_pruga_Beograd_%E2%80%93_Bar

Во меѓународна смисла, пругата Врбница – Бар е најважниот инфраструктурен објект во Црна Гора. Нејзината сообраќајна позиција во TEN-T мрежата во голема мера зависи од состојбата на оваа пруга и нејзината употреба во меѓународниот сообраќај. Подобрувањето на состојбата и нејзината пристапност природно би придонело за нејзина поголема меѓународна атрактивност и би ја доближило до важноста која ја имаат коридорите во склоп на TEN-T мрежата.

Пристаништето Бар е најважниот генератор на проток за црногорскиот дел од железницата Белград-Бар. Според нејзините клучни карактеристики, оваа пруга може да се означи како пристанишна пруга. Без валоризација на пристаништето Бар не е можна и валоризација на пругата Белград – Бар и обратно. Глобализацијата и слободната трговија им дадоа поттик на пристаништата кои доживуваат ренесанса низ целиот свет. Денес, пристаништата се најефективните места за отворање пазари и создавање уникатен транспортен сектор. Исто така, тоа е најзначајното место на генерирање на интермодален транспорт на стоки. Пристаништето во Бар, каде што се обработуваат сите видови товар, нуди големи можности за понатамошен развој на интермодалните и сите комбинирани сообраќајни техники и поврзување на целиот регион токму поради постоењето на железницата Белград – Бар. За да се искористи потенцијалот, неопходно е да се изградат терминали за комбиниран транспорт на железничките станици Бар, Подгорица и Бијело Поље [96].

И покрај огромното значење на железничката линија Врбница – Бар за економијата и фактот што, како дел од меѓународната железница Белград – Бар, ги поврзува најважните светски поморски поврзувања (Америка, Медитеранот, Блискиот Исток, Средниот Исток и Далечниот Исток) со главните европски железници, од 1976 до 2009 година, немало поголеми инвестиции, што резултираше со намалување на пропусната моќ на железницата.

Согласно Стратегијата за развој на сообраќајот и во согласност со потребите за подобро искористување на потенцијалот на железницата и пристаништето Бар, работите на рехабилитација на пругата Врбница – Бар започнаа во 2009 година. Направен е ремонт на горниот строј на пругата од Бијело Поље до Колашин во должина од 43.4 km отворена пруга или 26% од вкупната должина од Врбница до Бар (167 km), заменети се 22.000 прагови и

вградени се 13.8 km шини. Направена е санација на шест тунели, три свлечишта и шест косини [96].

Заради потребите за подобро искористување на потенцијалот на железницата и пристаништето Бар, работите на рехабилитација на пругата Врбница – Бар се изведуваат периодично во подолг временски период, од 2005 до 2019 година (Табела 9).

Табела 9. Ремонт на пругата Врбница – Бар во период од 2005 година до 2021 година (Извор: податоци од Železnicka Infrastruktura Crne Gore ad, ŽICG)

Делница	Година
Мојковац - Требаљево	2005
Државна граница со Србија – Бијело Поље – Крушево – Мијатово Коло	2009 – 2010
Требаљево - Колашин	2011
Колосеци на станица Требешица	2012
Мијатово Коло - Мојковац	2012 – 2013
Колашин – Кос	2016
Вирпазар – Сутоморе (тунел Созина)	2016 – 2017
Кос - Требешица	2018 – 2019

На делот од пругата од државна граница со Србија до станицата Требешица, во периодот од 2006 до 2019 година извршен е ремонт на горниот строј и зголемена е брзината на движење на возовите од 50 km/h на 80 km/h, што претставува максималната брзина на движење за овој дел од пругата, земајќи ја предвид трасата на железницата и условите за работа. На делот од пругата од Требешица до Бар не е направен ремонт, со исклучок на 6.17 километри долгиот тунел Созина на кој е направен ремонт. На овој дел од пругата долга 95.65 километри, поради состојбата на елементите на горниот строј на железницата, нестабилните косини и активните свлечишта, брзината на движење на возовите е во граници од 30 до 70 km/h. Со ремонт на овој дел од железницата и санација на косините и свлечиштата, можно е да се воспостави максимална брзина на движење на возовите од 80 до 100 km/h. Комплетната пруга претставува една од најтешките пруги за одржување и експлоатација во Европа [96].

3.2. Геометриски карактеристики на пругата

Геометриските карактеристики на железничката пруга Врбница – Бар поделени помеѓу делниците, се прикажани во следната табела:

Табела 10. Геометриски карактеристики на пругата Врбница – Бар (Извор: податоци од Železnicka Infrastruktura Crne Gore ad, ŽICG)

	Делница	Стационажа		Должина (km)	Геометрија			
		Од km	До km		$i_{\max}$ (‰)	$R_{\min}$ (m)	ΣD_k (m)	K (%)
1	Бијело Поље – Мојковац	287.4	314.6	27.2	18.1	290	18 027	66.37
2	Мојковац – Требаљево	314.6	339.6	25	17.8	300	14 502	58.01
3	Требаљево – Колашин	339.6	364.4	24.8	25.0	300	7 954	32.1
4	Колашин – Подгорица	364.4	404.1	39.7	24.9	300	26 060	65.6
5	Подгорица – Вирпазар	404.1	431.7	27.6	7.4	300	7 787	28.2
6	Вирпазар – Бар	431.7	455.6	23.9	24.0	300	8 602	36.0
Врбница – Бар				167.1		290	82 932	49.3%

Вкупната должина на железничката пруга е 167.1 km, а вкупната должина на трасата во кривина е 82.9 km; така што 49.3% од железничката пруга е во кривина и 50.7% во правец.

Процентот на закривеност (K) го претставува односот помеѓу вкупната должина на хоризонталните кривини на секоја делница и вкупната должина на истата делница L_n . По должина на трасата кај преодните кривини применети се кубни параболи.

Поради исклучително сложената конфигурација на теренот (карактеристики на планинска пруга), на голем дел од трасата има вештачки објекти. Во табелата подолу се прикажани објектите по должина на трасата (пропусти, мостови и тунели), со нивниот број и должина.

Табела 11. Објекти по должина на пругата Врбница – Бар (Извор: податоци од Železnicka Infrastruktura Crne Gore ad, ŽICG)

Тип на објект	Број	Материјал	Вкупна Должина [m]
1. Пропусти			
Цевасти пропусти	195	бетон	6.197,67
Плочести пропусти	153	бетон	3.278,69
Сводести пропусти	24	бетон	477,33
2. Мостови			
Бетонски мостови	92	бетон	5.801,79
Челични мостови	16	челик	2609,90
3. Тунели и галерии			
Тунели	107		52.512,13
Вкупно:	589		70.877,51

Од овие податоци може да се заклучи дека на 43% од трасата на железничката пруга Врбница – Бар има вештачки објекти.

3.3. Карактеристики на горниот строј на колосекот

- Шини

Железничката пруга ја сочинуваат класични споеви на шини со споен колосечен прибор (СКП) составен од две метални плочки и шрафови и шини заварени во долги шински ленти (ДШЛ). Шина која е применета по цела должина на трасата е тип S49E1. Карактеристики за применетиот тип на шина се прикажани во табела 12.

Табела 12. Карактеристики на тип на шина S49 (Извор: податоци од Železnicka Infrastruktura Crne Gore ad, ŽICG)

Карактеристики	Тип на шина S49
Тежина (kg)	49.4
F (cm ²)	63.0
I _x (cm ⁴)	1819
I _y (cm ⁴)	320
W _x (cm ³)	240
W _y (cm ³)	51

На најголемиот дел шините се заварени во долги шински ленти (ДШЛ), односно на 97.40% од вкупната должина на пругата. На останатиот дел (2.60%) шините се споени со

примена на споен колосечен прибор (СКП). Во Прилог 1 се прикажани стационажи и должини од пругата на кои има различни споеви на шините и година на нивно вградување.

- Прагови

Дрвото е доминантен материјал од кои се изработени праговите кои се вградени на пругата Врбница – Бар, со околу 90% од вкупниот број прагови. Осовинското растојание помеѓу праговите изнесува 600 mm. Бетонски моноблок со димензии 30 x 20 x 240 cm е вграден на делница Вирпазар – Бар, на должина на која се протега тунелот Созина од km 438.86 до km 445.58. Посебен тип на прагови од тврдо дрво се применети на мостовските конструкции, односно дабови мостовски прагови со димензии 26 x 24 x 280 cm. Карактеристиките на применетите типови прагови се прикажани во табела 13.

Табела 13. Каталог на применети типови на прагови на пругата Врбница – Бар (Извор: податоци од ŽICG)

Тип на прагови	Име на тип на прагови	Опис	Очекуван животен век [години]	Очекуван животен век [MGT]
1	тврдо дрво 26 x 16 x 260 cm	букови колосечни прагови	20	200
2	бетонски моноблок 30 x 20 x 240 cm	бетонски прагови	50	500
3	тврдо дрво 26 x 24 x 280 cm	дабови мостовски прагови	30	300

- Систем за прицврстување

Најраспространетиот систем за прицврстување на трасата е крут К-систем за делниците каде што се поставени дрвените прагови, односно овој систем за прицврстување е применет на 96% од должината на трасата. Еластичните прицврстувања SKL-14 со поголема еластичност се применуваат во случај кога има преднапрегнати бетонски прагови, и се поставени на делницата Вирпазар – Бар, на целосната должина на која се протега тунелот Созина од km 438.86 до km 445.58. Еластични прицврстувања SKL - B12 се применети на целосната должина на челичниот мост “Морача” од km 424.93 до km 425.03. Карактеристиките на применетите системи за прицврстување се прикажани во Табела 15. Во Прилог 2 се прикажани стационажи и должини од пругата на кои има различни типови на применети прагови и систем за прицврстување, како и година на нивно вградување.

Табела 14. Каталог на применети типови на систем за прицврстување (Извор: податоци од ŽICG)

Тип на систем за прицврстување	Име на тип на систем за прицврстување	Опис	Очекуван животен век [години]	Очекуван животен век [MGT]
1	К систем	крут колосечен систем	20	200
2	SKL- B12	еластичен колосечен систем	20	200
3	SKL - 14	еластичен колосечен систем	20	200

- Засторна призма

Засторната призма е составена од кршен варовник, со дијаметар на зрната 25/50 mm за делници помеѓу железнички станици (на отворена пруга). Единствено на потегот од km 438.86 до km 445.58, по должина на тунелот Созина применет е еруптивец со дијаметар на зрната 25/50 mm. Дебелината на засторната призма се проценува на 30 cm измерени под долната належна површина на прагот. Засторот често се контаминира со трошење на засторниот материјал или со пенетрација на фини честички во форма на глинена смеса и кашеста маса. Карактеристиките на засторна призма се прикажани во табела 15.

Табела 15. Каталог на применети типови на засторна призма (Извор: податоци од ŽICG)

Тип на засторна призма	Име на тип на засторна призма	Опис	Очекуван животен век [години]	Очекуван животен век [MGT]
1	варовник 25/50 mm	287.438-314.600	25	250
2	еруптивец 25/50 mm	438.860-445.577	30	300

3.4. Сообраќајно оптоварување

Обемот на сообраќај на пругата Врбница – Бар е проектиран на 6 милиони тони годишен товар и 4 милиони патници [137]. Годишно во железничкиот сообраќај се превезуваат до 1,2 милиони патници и 1,5 милиони годишен товар. Кога се знае дека обемот на сообраќај на пругата Врбница – Бар е проектиран на 6 милиони тони годишно и 4 милиони патници, и дека најголемиот обем е достигнат на крајот на 80 – тите години на минатиот век, со транспорт на товар од 4,5 милиони тони, а во почетокот на 90 – тите 3 милиони патници, евидентно е дека поради зголемената доминација на патниот сообраќај и исклучувањето или намалениот обем на производство на стопанските субјекти во земјата и регионот во последните десет години, Црна Гора превезува една третина од некогаш реализираниот превоз на стока и патници [137].



Слика 27. Број на патнички возови пуштени во локален и меѓународен сообраќај (Извор: податоци од Željeznički prevoz Crne Gore)

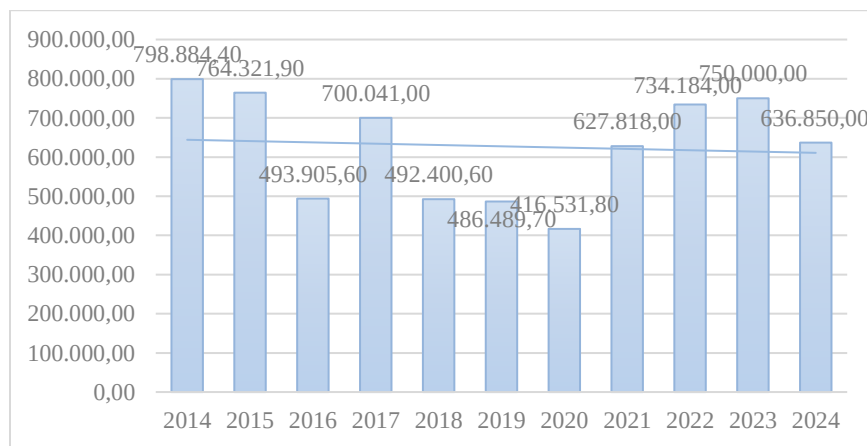
На слика 27 даден е графички приказ со број на патнички возови пуштени во локален и меѓународен сообраќај, за пругата Врбница – Бар, во период од 2014 до 2022 година. Од графикот, може да се забележи дека нема значителен пораст на железничкиот сообраќај во овој период, односно има блага тенденција на намалување на вкупниот сообраќај и за локален и за меѓународен транспорт. Во однос на осовинското оптоварување, на оваа линија има максимално осовинско оптоварување од 22,5 t. Патничките возови сообраќаат со просечно 8 вагони во една композиција на возот, со просечна бруто маса од 40 тони по вагон.

Бруто тежината на товарните возови (Q) на пругите во Црна Гора е помала во споредба со регионот, бидејќи поголемиот дел од мрежата има голем меродавен надолжен наклон (до 25‰), така што во меѓународниот сообраќај со Србија тежината на овие возови е од 1000 до 1060 тони. И со оваа тежина, товарните возови на релација Подгорица - Колашин мора да се потиснуваат, бидејќи една електрична локомотива од серијата 461, која е застапена во возниот парк на превозникот, на оваа делница може да повлече најмногу 750

тони. Најтешките возови сообраќаат на делницата Подгорица - Бар, каде што максималниот надолжен наклон е 8‰, па може да се возат возови со маса до 2000 тони [137].

Од достапните информации со кои располагаат јавните претпријатија во Црна Гора (ŽICG и Željeznički prevoz Crne Gore), добиен е податок дека на пругата Врбница–Бар дневно сообраќаат два меѓународни патнички воза (еден пар) помеѓу Белград и Бар. Дополнително, во летната сезона, од 16 јуни до 17 септември, се воведува и дневен меѓународен воз на оваа релација. Во однос на локалниот сообраќај, дневно сообраќаат четири локални патнички возови. Со тоа вкупниот број на патнички возови (меѓународни и локални) дневно изнесува седум возови.

Графикот на Слика 38 прикажува реализиран товарен сообраќај (во нето тони) на железничката пруга Врбница – Бар во периодот од 2014 до 2024 година. Од 2015 до 2020 година се забележува опаѓачки тренд, при што најниската вредност е достигната во 2020 година со 416.531,80 тони. По оваа година, започнува постепено зголемување, со втора највисока вредност забележана во 2023 година.



Слика 28. Остварен товарен сообраќај во нето тони (Извор: податоци од ŽICG)

Според достапните информации, на пругата Врбница–Бар дневно сообраќаат во просек пет товарни возови. Оваа фреквенција може да варира во зависност од сезоната, побарувачката и оперативните услови.

Во докторскиот труд, како параметар кој влијае на деградација на колосекот е земено влијанието на товарниот и на патничкиот сообраќај. Интеграцијата на реализираниот сообраќај како параметар во предвидувањето на дефектите за геометријата на колосекот е критичен аспект за разбирање на механизмите кои доведуваат до деградација.

3.4.1. Сообраќајно оптоварување според UIC

Меѓународната железничка унија (UIC) има воспоставено унифицирана методологија за процена на теоретското дневно сообраќајно оптоварување (T_f), која овозможува квантификација на вкупниот товар што железничката инфраструктура го пренесува во еден ден. Пресметката е основа за класификација на железничките линии според нивната носивост, за планирање на одржувањето и за анализа на експлоатационите услови на инфраструктурата [97].

Формула за пресметка на T_f .

$$T_f = S_v * (T_v + K_t * T_{tv}) + S_m * K_m * (T_m + K_t * T_{tm})$$

T_v — Дневно оптоварување од патнички сообраќај (брuto тони)

T_m — Дневно оптоварување од товарен сообраќај (брuto тони)

T_{tv} — Дневно оптоварување од влечни единици за патнички сообраќај (брuto тони)

T_{tm} — Дневно оптоварување од влечни единици за товарен сообраќај (брuto тони)

S_v и S_m — Коефициенти за брзина (за патнички и товарни возови) кои ги прилагодуваат вредностите според брзината на сообраќајот, бидејќи побрзите возови предизвикуваат поголемо динамичко оптоварување врз пругата.

Табела 16. Вредности за коефициентите S_v и S_m кои ги дефинира UIC според брзината на возовите (Извор: [97])

Брзина на возовите (V)	Коефициент S _v (патнички)	Коефициент S _m (товарни)
V ≤ 60 km/h	1,00	1,00
60 km/h < V ≤ 80 km/h	1,05	1,05
80 km/h < V ≤ 100 km/h	1,15	1,15
100 km/h < V ≤ 130 km/h	1,25	1,25
130 km/h < V ≤ 160 km/h	1,35	1,35
160 km/h < V ≤ 200 km/h	1,4	1,4
200 km/h < V ≤ 250 km/h	1,45	1,45
V > 250 km/h	1,50	1,50

Железничката линија Врбница – Бар се карактеризира со мешовит сообраќај, каде што патничките и товарните возови ја користат истата инфраструктура, со релативно слични брзини на движење. Според експлоатационите податоци, патничките возови се движат во опсег од 60 до 100 km/h, а товарните од 60 до 80 km/h. Врз основа на табелата од UIC, усвоени се следниве вредности:

Табела 17. Усвоени вредности на корективните коефициенти за пресметка на дневното сообраќајно оптоварување според методологијата на UIC (Извор: [97])

Параметар	Опис	Образложение
S_v = S_m = 1.10	Коефициенти за брзина	Мешовит сообраќај со брзини 60–100 km/h
K_t = 1.40	Коефициент за осовинско оптоварување на локомотивите	Електрични и дизел-електрични локомотиви со 20 t/оска
K_m = 1.15	Коефициент за влијание на товарниот сообраќај	Преовладувачки товарни возови со ≤ 20 t/оска

Овие вредности овозможуваат унифицирана и конзервативна проценка на оптоварувањето врз инфраструктурата, без фаворизирање на еден тип на сообраќај, што е особено важно за линии со мешан карактер.

За пресметката на сообраќајното оптоварување користени се релевантни оперативни податоци добиени во консултација со Железнички превоз на Црна Гора. Овие податоци опфаќаат детални информации за бројот на товарни и патнички возови, нивната брuto маса, како и бројот и тежината на локомотивите кои оперираат на железничката линија Врбница – Бар. Податоците, систематизирани и прикажани во табела 18, претставуваат основа за детална анализа на товарното и патничкото оптоварување, овозможувајќи прецизна проценка на експлоатационите услови и динамичкото влијание на железничкиот сообраќај врз инфраструктурата во анализираниот временски период.

Табела 18. Податоци за пресметка на сообраќајно оптоварување (Извор: Податоци добиени од Железнички превоз на Црна Гора)

Година	Број на товарни возови	Број на патнички возови	Број на товарни локомотиви	Број на патнички локомотиви	Тежина на товарен воз (t)	Тежина на патнички воз (t)	Тежина на товарна локомотива (t)	Тежина на патничка локомотива (t)
2014	4,7	26	4,7	26	1.050	8 * 40	120	100
2015	4,6	25	4,6	25	1.050	8 * 40	120	100
2016	4,3	31	4,3	31	1.050	8 * 40	120	100
2017	4,5	22	4,5	22	1.050	8 * 40	120	100
2018	4,3	27	4,3	27	1.050	8 * 40	120	100
2019	4,2	25	4,2	25	1.050	8 * 40	120	100
2020	4,2	18	4,2	18	1.050	8 * 40	120	100
2021	4,5	22	4,5	22	1.050	8 * 40	120	100
2022	4,7	24	4,7	24	1.050	8 * 40	120	100
2023	4,7	24	4,7	24	1.050	8 * 40	120	100
2024	4,6	25	4,6	25	1.050	8 * 40	120	100

Во табелата, вредноста „8 × 40“ претставува пресметка на вкупната бруто маса на патничките возови. Бројот 8 означува просечен број на патнички вагони во составот на една возна композиција, додека бројот 40 ја претставува просечната бруто маса на еден патнички вагон, изразена во тони.

Врз основа на податоците прикажани во табела 18, спроведена е детална анализа на дневното сообраќајно оптоварување за периодот 2014–2024 година, при што за секоја година се пресметани клучните параметри за товарниот и патничкиот сообраќај.

Пресметката се врши со примена на формулата за теоретското дневно сообраќајно оптоварување дефинирана од UIC, каде што се земаат предвид бруто масата на возовите, корективните коефициенти за брзина (S_v , S_m), како и осовинските оптоварувања (K_t , K_m). Со примената на овие параметри, се добива прецизна проценка на оптоварувањето што железничкиот сообраќај го создава врз инфраструктурата.

- **2014 година**

$$T_m = 4,7 \text{ (товарни возови)} * 1.050 \text{ t (товар на композиција)} = 4.935 \text{ t}$$

$$T_v = 26 \text{ (патнички возови)} * 8 \text{ (просек коли)} * 40 \text{ t (бруто маса)} = 8.320 \text{ t}$$

$$T_{tm} = 4,7 \text{ (товарни локомотиви)} * 120 \text{ t (тежина на локомотива)} = 564 \text{ t}$$

$$T_{tv} = 26 \text{ (патнички локомотиви)} * 100 \text{ t (тежина на локомотива)} = 2.600 \text{ t}$$

- Коригиран товарен сообраќај:

$$T_m * K_m = 4.935 * 1,15 = 5.675,25 \text{ t}$$

- Коригирани товарни локомотиви:

$$T_{tm} * K_t = 564 * 1,40 = 789,60 \text{ t}$$

- Коригирани патнички локомотиви:

$$T_{tv} * K_t = 2.600 * 1,40 = 3.640 \text{ t}$$

Вкупно дневно оптоварување:

$$T_f = (1,1 * (8.320 + 3.640)) + (1,1 * 1,15 * (4.935 + 789,60))$$

$$\underline{\underline{T_f = 20.270 \text{ t/ден}}}$$

Пресметките за сите години се спроведени со истиот метод и усвоени коефициенти. Табелата подолу ги прикажува добиените вредности за Tf.

Табела 19. Пресметани вредности на дневното сообраќајно оптоварување (Tf) за железничката линија Врбница – Бар во периодот 2014–2024 година (Извор: Сопствени пресметки)

Година	Број на товарни возови	Број на патнички возови	Tf (t/ден)
2014	4.7	26	20 270
2015	4.6	25	19 730
2016	4.3	31	22 190
2017	4.5	22	17 940
2018	4.3	27	20 170
2019	4.2	25	19 005
2020	4.2	18	15 470
2021	4.5	22	17 940
2022	4.7	24	19 260
2023	4.7	24	19 260
2024	4.6	25	19 730

Во согласност со добиените резултати од пресметките на дневното сообраќајно оптоварување, железничката линија Врбница – Бар се категоризира според UIC во однос на нејзината носивост и експлоатациски капацитет. Врз основа на пресметаното осовинско оптоварување, линијата спаѓа во категоријата D3 (≤ 20 t/оска), што ја класифицира како стандардна товарна железничка мрежа.

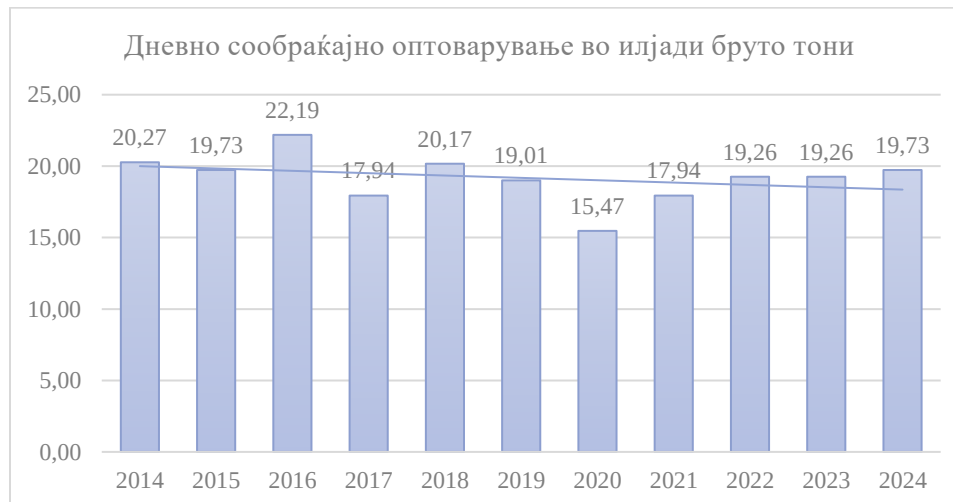
Дополнително, анализата на годишното бруто оптоварување покажува дека линијата се вклопува во категоријата [Z], што дава значајни информации за планирањето на одржувањето и дозволените експлоатациони параметри. Оваа категоризација е клучна за понатамошно дефинирање на ограничувањата во однос на типот и товарниот капацитет на возовите, како и за долгорочното стратеско планирање на железничката инфраструктура.

Графикот на слика 29 прикажува дневно сообраќајно оптоварување на железничката линија Врбница – Бар, изразено во илјади бруто тони, за периодот од 2014 до 2024 година. Податоците се добиени со примена на методологијата на UIC за проценка на теоретското дневно оптоварување, при што се земени предвид патничкиот и товарниот сообраќај, како и корективните коефициенти за осовинско оптоварување и брзина. Анализата на податоците овозможува согледување на трендовите во оптоварувањето на железничката инфраструктура и оценка на експлоатациските карактеристики на железничката мрежа.

Во 2016 година, дневното сообраќајно оптоварување достигнува 22,19 илјади бруто тони, што претставува максимална вредност во анализираниот период. Ова е резултат на зголемениот број на патнички возови, кои достигнале 31 воз дневно, што значително придонело за вкупниот товар на инфраструктурата. По оваа година, започнува тренд на постепено опаѓање, при што во 2017 година оптоварувањето изнесува 17,94 илјади бруто тони. Главни фактори за оваа појава се намалениот број на патнички возови, додека товарниот сообраќај останува релативно стабилен.

Во 2020 година, забележана е најниската вредност на дневното сообраќајно оптоварување, која изнесува 15,47 илјади бруто тони. Овој пад е директна последица на намалениот број на патнички возови, што е поврзано со рестрикциите воведени во железничкиот сообраќај за време на пандемијата на COVID-19. Товарниот сообраќај во овој

период останува стабилен, но драстичното намалување на фреквенцијата на патничките возови доведува до значително опаѓање на вкупното оптоварување на инфраструктурата.



Слика 29. Пресметано дневно сообраќајно оптоварување за железничката пруга Врбница – Бар

Од 2021 година се забележува тенденција на стабилизација, при што дневното оптоварување постепено се зголемува и во 2023 година достигнува 19,26 илјади бруто тони, што претставува фаза на закрепнување на железничкиот сообраќај, особено во сегментот на патнички возови. Оваа стабилизација е резултат на постепено враќање на патничките железнички услуги по укинувањето на ограничувањата воведени поради пандемијата и подобрувањето на експлоатационите услови. Проценетата вредност за 2024 година изнесува 19,61 илјади бруто тони и е речиси идентична со вредностите од претходната година, што ја претставува фазата на одржлив и стабилен режим на експлоатација на железничката инфраструктура во поновиот период.

Анализата на податоците покажува дека железничката инфраструктура била најоптоварена во 2016 година, по што следи тренд на намалување, кој главно се должи на флукуации во патничкиот сообраќај. Пандемијата на COVID-19 значително влијаела врз железничкиот сообраќај, особено во 2020 година, кога е забележано најниското оптоварување. По 2021 година, се забележува стабилизирање на експлоатацијата и постепено враќање како пред-пандемските нивоа на активности.

Вредностите за 2023 и 2024 година покажуваат релативно стабилно дневно оптоварување, што покажува константна експлоатација на инфраструктурата во наредниот период.

3.5. Брзина на движење на возовите на пругата Врбница – Бар

Проектираната брзина на пругата Врбница – Бар се движи во граници од 70 km/h до 100 km/h, усвоена во согласност со теренската конфигурација и проектните услови на поединечните делници. Намалувањето на максимално дозволените брзини претставува последица на оперативната старост на инфраструктурата, во комбинација со ограничени инвестиции во ремонт и модернизација.

Недоволното редовно одржување и отсуството на систематски мерки за доведување на трасата до проектното ниво довеле до зголемена разлика меѓу проектираната и актуелната состојба на колосекот, што директно се одразува врз нивото на техничка

доверливост и технолошката достапност на инфраструктурните капацитети, а со тоа и врз дозволените брзини и редовноста на железничкиот сообраќај.

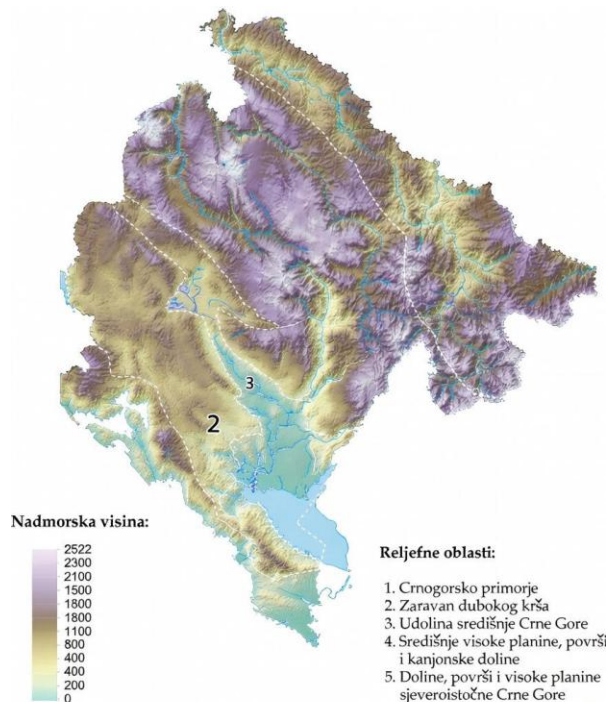
Во Табела 20 прикажани се делниците на пругата Врбница – Бар со моменталните максимално дозволени брзини на возење. Од податоците може да се констатира дека на 50,23% од вкупната должина на трасата задржана е проектираната брзина, додека на 49,77% брзината е намалена поради состојбата на колосекот или на околниот терен.

Табела 20. Преглед на брзини на возење на пругата Врбница – Бар (Извор: [94])

Делница на пругата од km до km	Проектна брзина (km/h)	Моментална брзина (km/h)	Причина за намалување на брзината на возење
287+438 – 298+420	80	80	
298+420 – 298+530	80	30	Потребна е санација на трупот на пругата, L=110m
298+530 – 303+800	80	80	
303+800 – 304+800	80	50	Новоизградениот трет колосек не е електрифициран, L=1000m
304+800 – 311+250	80	80	
311+250 – 311+750	80	30	Потребна е санација на конструкцијата на мостот “Ljuboviđa”, L=500m
311+750 – 321+890	80	80	
321+890 – 322+020	80	50	Потребна е замена на колосечната структура на мостот “Tara I”, L=130m
322+020 – 358+800	80	80	
358+800 – 364+500	80	50	Потребен е ремонт на горниот строј, L=5700m
364+500 – 370+000	75	30	Нестабилни косини, L=5500m
370+000 – 379+100	75	50	Потребен е ремонт на горниот строј, L=9100m
379+100 – 394+400	75	60	Потребен е ремонт на горниот строј, L=5300m
394+400 – 397+700	75	40	Нестабилни косини, L=3300m
397+700 – 399+900	75	60	Потребен е ремонт на горниот строј, L=2200m
399+900 – 405+100	90	60	Потребен е ремонт на горниот строј, L=5200m
405+100 – 415+800	100	70	Потребен е ремонт на горниот строј, L=10700m
415+800 – 436+400	75	70	Потребен е ремонт на горниот строј, L=19600m
436+400 – 437+100	75	50	Свлечиште, L=700m
437+100 – 439+032	75	70	Потребен е ремонт на горниот строј, L=1932m
439+032 – 445+540	80	80	
445+540 – 448+980	70	70	
448+980 – 450+300	70	20	Свлечиште, L=1320m
450+300 – 454+800	70	70	

3.6. Геоморфолошки и геолошки карактеристики на теренот

Комплексната геолошко-литолошка и тектонска структура, заедно со изразените процеси на ерозија, придонесуваат релјефот на Црна Гора да биде мошне динамичен и разновиден. Драстичните висински промени на релативно кратки растојанија претставуваат една од највпечатливите карактеристики на просторот. Денешниот изглед на релјефот е резултат на долготрајни радијални и тангенцијални геотектонски движења, обликувани под влијание на надворешните егзогени влијанија. Висинската структура на теренот ги одразува остатоците од постарите геоморфолошки форми и ја потврдува изразената динамика и расцепканост на релјефот на целата територија на Црна Гора.



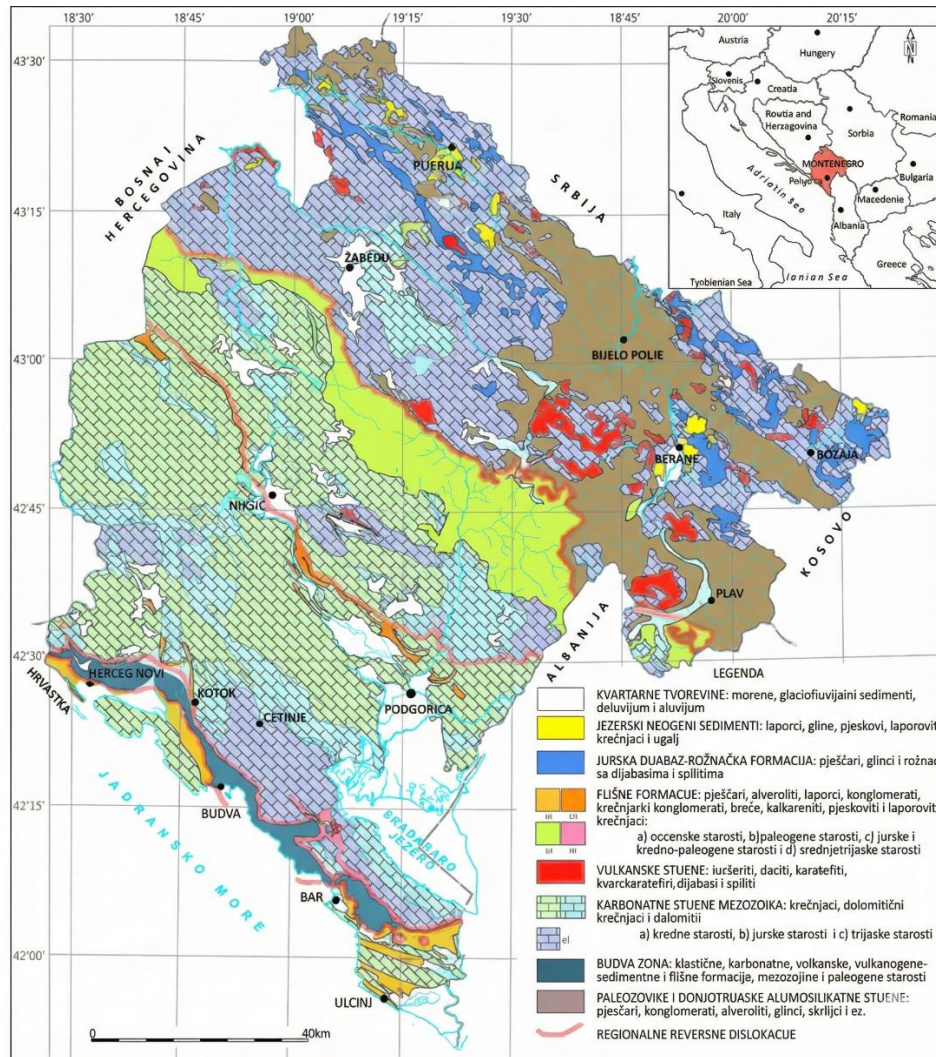
Слика 30. Главни геоморфолошки и рељефни единици на територијата на Црна Гора со означена траса на железничката линија Врбница – Бар. Извор: [98])

На територијата на државата се издвојуваат пет вертикални рељефни зони:

1. Тесен крајбрежен појас, кој ги опфаќа Подгоричко – Скадарскиот слив и Бјелопавличката рамнина (0–60 m).
2. Длабоко карстно плато, што го сочинуваат Катунскиот карст, Кривошије, Граховскиот крај, Рудине и Бањани (800–900 m).
3. Долината на централна Црна Гора (900–1200 m).
4. Централни високи рамнини (1200–1800 m), пресечени со длабоки кањонски долини, над кои се издигаат високи планини со бројни врвови над 2000 m.
5. Североисточна Црна Гора (600–1500 m), која опфаќа планински венци, речни долини и басени врамени со гранични планини со надморска височина над 2000 m.

Од вкупната површина на Црна Гора (13.812 km²), околу 10% од земјиштето се наоѓа на височини до 200 m, 40% меѓу 200 и 1000 m, а приближно 15% на над 1500 m. Просечната надморска височина изнесува околу 1050 m. Литолошката структура, геотектонската положба и ерозивните процеси довеле до формирање на повеќе издвоени рељефни целини кои се значително различни една од друга [98].

Според Просторниот план на Црна Гора до 2040 година, територијата на државата е изградена од формации создадени во изминатите 400 милиони години. Карпестите маси припаѓаат на палеозојскиот, мезозојскиот и кенозојскиот систем.



Слика 31. Геолошка карта на Црна Гора (Извор: [98])

Палеозојските карпи се составени од шкрилести, глинено-лапоровити и песочни слоеви со дискретни вметоци од варовник и конгломерат, и главно се распространети во североисточниот дел на Црна Гора.

Мезозојските карпи се застапени со повеќе литолошки фаии:

- Карбонатна фаија – доминирана од варовници и доломити, кои ја формираат познатата геотектонска единица „Висококарстна зона“.
- Магматска и вулканогено-седиментна фаија – составена од еруптивни карпи, туфови, туфити, рожњаци и варовници наместа со глиновити примеси од карстификацијата.
- Дијабазно-рожњачка фаија – вклучува седиментни, вулкански и магматски карпи.
- Флишна фаија – изградена од глини, лапори, песочници, варовници и нивни преодни вариетети, со присуство на бречи и конгломерати.

Кенозојските карпи се застапени со карбонатни и флишни фаии од палеогенот, неогени морски и слатководни седименти, како и квартерни наноси од песок, чакал и блокови со или без глина, кои потекнуваат од глацијални, флувиоглацијални, лимноглацијални, делувијални и алувијални процеси [98].

3.7. Инженерско геолошки карактеристики

Инженерско-геолошките карактеристики на теренот претставуваат клучен фактор при проектирање, изградба и одржување на инфраструктурни објекти, како и при урбанистичко планирање и користење на просторот. Тие имаат особено значење при земјотреси и други динамички процеси, кога нестабилните и условно стабилните терени може да се активираат и да доведат до лизгања, откорнувања или рушења со потенцијално сериозни последици.

Според инженерско-геолошките својства, карпестите маси во Црна Гора се поделени во три главни групи: неврзани, полуврзани (нескаменети) и врзани (скаменети) карпи.

1. Неврзани карпи

Оваа група ја сочинуваат кластични седиментни наслаги од квартерна старост: делувијални, алувијални, терасни, моренски и главнофлувијални седименти. Нивниот гранулометриски состав опфаќа прашина, песок, чакал, шут и блокови, со изразена интергрануларна порозност и различна содржина на вода.

Нестабилноста е најчесто изразена кај делувијалните наслаги. Овие карпи се јавуваат во речните корита и по падините на кањоните и долините на реките Ибар, Лим, Кехотина, Тара, Пива и Морача, како и во рамничарските делови покрај Јадранскиот брег.

Наслагите со глацијално потекло се развиени во зоните на високите планини Маганик, Војник, Маглиќ, Дурмитор, Сињавина, Комови и Проклетије, како и покрај долините на околните реки.

2. Полуврзани (нескаменети) карпи

Во оваа група спаѓаат езерски и лимноглацијални седименти, квартерни глини и песоци, неогени глини и лапори со јагленови слоеви, како и морски песоци и глини. Се карактеризираат со пластично врзивно средство, променливи физичко-механички својства и честа појава на нестабилност.

Овие карпи генерално се слабо водопропустливи.

Најшироко се распространети на северниот раб на Скадарското Езеро, во Бјелопавличката рамнина, Никшиќкото поле, како и во околината на Плевља, Маоч, Матаруге, Беране и Полимље. Морски песоци и глини се јавуваат во околината на Улцињ.

3. Врзани (скаменети) карпи

Оваа група опфаќа карпи со различна старост, литолошки состав и генеза. Во рамките на групата се издвојуваат две подкласи: скаменети и полускаменети карпи и добро скаменети карпи.

Скаменети и полускаменети карпи

Овде спаѓаат кластични, метаморфни и вулканогено-седиментни карпи.

- Кластичните карпи вклучуваат разновидни флишни слоеви (песочник, лапорец, варовник, конгломерат, бреча) како и долнотријаски и пермиски песочници и шкрилци. Тие имаат разновиден состав и различни физичко-механички својства,

подложни се на површинска деградација и се склони кон расцепување и нестабилност.

- Метаморфните карпи (кварцити, конгломерати, филити, серпентинити, аргилофилити и варовници од палеозојска доба) се распространети претежно во североисточна Црна Гора. Тие се ситнозрнести, разновидни по состав и често подложни на ерозија и површинско распаѓање.
- Вулканогено-седиментните формации, особено формацијата јура дијабаза–рожначка и среднотријасната вулканогено-седиментна серија, се хетерогени и анизотропни по состав, структура и физичко-механички карактеристики.

Добро скаменети карпи

Оваа класа ги опфаќа најцврстите и најстабилни карпести маси на територијата на Црна Гора. Тие се магматски и седиментни по потекло:

- Магматските карпи (кератофири, кварцни кератофири, андезити, дијабази, спили) се компактни, хомогени и механички стабилни.
- Седиментните карпи се претежно силикатни или карбонатни (черти, варовници, доломити) и се карактеризираат со висока цврстина и стабилност.
- Карбонатните формации, кои доминираат во централна и западна Црна Гора, се интензивно карстифицирани и раседнати, а нивните физичко-механички својства зависат од степенот на пукање и карстификација. Иако генерално се стабилни, на овие терени може да се јават појави на свлекување и одронување на блокови по стрмни падини и кањони [98].

3.7.1. Геолошки и хидрогеолошки карактеристики на подрачјето Колашин – Подгорица

Трасата на железничката делница Колашин – Подгорица минува низ геолошки разновиден и морфолошки сложен терен, кој припаѓа на централниот дел на Динаридите, карактеризиран со изразена тектонска расчленетост и разновидни литолошки единици од палеозојска до квартерна старост. Според Геолошката карта на Црна Гора 1:200.000 и податоците од Просторниот план на Црна Гора до 2040 година [98], во поголемиот дел од трасата доминираат варовници и доломити од тријаско-јурска старост, кои се компактни, но подложни на карстификација и развој на подземна циркулација на води.

Во планинскиот дел на трасата, кај Колашин и Морача, застапени се масивни карбонатни формации со изразена кавернозност и пукнатинска порозност, меѓу кои преовладуваат варовници и доломити со ансизиски и норски фации [99]. Овие карпи се хидрогеолошки колектори со висока пропустливост, што овозможува развој на длабоки карстни издани и подземни текови.

Во долниот дел на трасата, од Биоче кон Подгорица, карбонатните карпи преминуваат во неогени и квартерни седименти на Зетската и Бјелопавлиќката рамница. Тие се изградени од песоци, чакали, глини и алувијални наноси, кои создаваат интергрануларни водоносни слоеви со значителна водопрпусност [98].

Палеозојските и флишни карпи (песочници, лапорци, шкрилци) се јавуваат во ограничени зони, најизразено во околината на Морача и Трешњевик. Овие формации имаат пониска компактност и често се поврзани со ерозивни процеси и појава на клизишта, што има значење при оценка на стабилноста на долниот строј [100].

Хидрогеолошки гледано, поширокото подрачје припаѓа на јадранскиот слив и претставува типично карстно подрачје – над 60% од територијата е изградено од

водопрпусни варовници и доломити [101]. Подземните води се движат кон Зетската рамница, каде што се акумулираат во алувијални седименти со голем капацитет. Поради ваквите услови, долината на реката Морача се карактеризира со бројни извори, повремени водотеци и карстни понори, при што ерозивните процеси се најизразени во пределот Морача – Платије.

Од инженерско-геолошки аспект, трасата може да се подели на две доминантни зони:

- Планинска зона (Колашин – Трешњевик – Морача): со компактни варовници и доломити, делумно расцепкани со тектонски линии и пукнатини, што претставува високоризично подрачје за карстни појави и нестабилности.
- Ниска зона (Биоче – Подгорица): со неогено-квартерни седименти и алувијални наслаги, со повисока подложност на слегнување, ерозија и промена на водонаситеност.

Овие геолошко-хидрогеолошки карактеристики имаат директно влијание врз стабилноста и одржувањето на долниот строј, како и врз динамиката на геометриската деградација на колосекот, што е особено изразено во зоните со карстни подземни празнини и висока водопрпусност.

3.8. Работи за одржување на горниот строј на железничката пруга Врбница – Бар

На железничката пруга Врбница - Бар најчести работи за одржување на горниот строј на пругата се: машинско регулирање на колосек со претходно обележување на осовината и нивелетата на колосекот, машинско планирање и обликување на засторната призма, рачно регулирање на колосек по смер/насока и нивелета, рачно подбивање на прагови и корекција на ширината на колосекот со преместување на прагови, рачно планирање на засторна призма. Овие податоци се достапни за периодот од 2017 година до 2024 година.

- Машинско регулирање на колосек

Машинското регулирање на колосек претставува основна техничка постапка со која се обезбедува враќање на колосекот во проектираната положба по смер/насока, нивелета и ширина. Со текот на времето, под влијание на динамичките оптоварувања и деформации во засторот, доаѓа до појава на отстапувања кои го нарушуваат правилниот геометриски распоред на колосекот. Регулирањето се изведува со специјализирани машини за подбивање кои овозможуваат подигнување, центрирање и стабилизирање на колосекот со прецизност од неколку милиметри. Во текот на процесот, машината со помош на сензори ја регистрира тековната положба на шините, по што преку систем на хидраулични клинови и вибрациони алати врши подбивање на засторот под праговите. На овој начин се постигнува повторно воспоставување на правилната геометрија на колосекот, со што се намалуваат вибрациите, се подобрува возниот комфор и се продолжува работниот век на праговите, шините и засторот. Со прецизно регулиран колосек, се обезбедува стабилност на траекторијата, рамномерно пренесување на оптоварувањето и сигурна експлоатација на возниот состав [102].

- Машинско планирање и обликување на засторната призма

Машинското планирање и обликување на засторната призма претставува составен дел од редовното одржување на колосекот. Целта на оваа активност е обезбедување правилен облик и густина на засторот со што се гарантира стабилност на колосекот и соодветна дренажа. Процесот започнува со чистење на засторот и отстранување на нечистотии, по што следи профилирање со помош на специјализирана механизација која го обликува засторот во стандарден попречен профил. Со додавање на свеж засторен материјал

со соодветна гранулометрија и со негово компактирање, се воспоставува оптимална густина и рамномерно потпирање на праговите. На крајот се врши формирање на страничните косини и геодетска проверка на висинските и страничните параметри. Ваквиот пристап овозможува непречен одвод на водата, намалување на ризикот од ерозија и долгорочна стабилност на колосекот [103].

- **Рачно регулирање на колосек по смер/насока и нивелета**

Рачното регулирање на колосек се применува во услови кога е отежнат машински пристап е отежнат или кога е потребна фина корекција на положбата. Постапката се спроведува со прецизни геодетски мерења на отстапувањата по смер и нивелета, по што шините се поместуваат хоризонтално и вертикално со помош на рачен алат. По корекциите, засторот под и околу праговите се дополнува и се компактира со рачни вибратори за да се обезбеди стабилност. Овој метод овозможува локални интервенции со високо ниво на точност, особено на места со ограничен пристап, како што се мостови, тунели или кривини со мал радиус. Рачното регулирање е економично и практично решение за санација на ограничени сегменти од трасата [104].

- **Рачно подбивање на прагови и исправување на ширината на колосекот**

Рачното подбивање на прагови се користи кога е потребно локално стабилизирање на колосекот или корекција на ширината меѓу шините. По инспекцијата на трасата се врши чистење на засторот, а со помош на лостови и специјализирани алати праговите се подигаат за да се овозможи рамномерно распоредување на засторниот материјал. Потоа засторот се компактира рачно или со вибрации за да се постигне потребната густина. Корекцијата на ширината на колосекот се изведува со поместување на шините и мерење со специјални мерни шини за постигнување на стандардната вредност. На овој начин се обезбедува стабилна и сигурна траса, особено во делови изложени на поголеми динамички влијанија. Методот е ефикасен за прецизни корекции и спречување на понатамошно деградирање на колосекот [105].

- **Рачно планирање на засторна призма**

Рачното планирање на засторната призма претставува фина завршна обработка на засторот со цел обезбедување правилен профил и дренажна функција. Со помош на рачни алатки, засторот се обликува во стандарден попречен профил, се пополнуваат празнините околу праговите, а страничните косини се оформуваат со соодветен наклон за да се спречи ерозија. Компакирањето се врши со рачни тапкачи или вибрациони уреди, по што следи финална проверка на геометријата и пропустливоста на засторот. Ваквиот пристап обезбедува подобра стабилност и долготрајност на горниот строј, особено на делници со ограничена можност за примена на механизација [106].

Спроведените активности за одржување на горниот строј на пругата Врбница–Бар обезбедуваат стабилна и безбедна состојба на колосекот под постојано механичко оптоварување. Комбинацијата од машински и рачни методи создава рамнотежа меѓу техничка прецизност и економичност, при што машинското регулирање и обликување на засторот обезбедуваат долгорочна стабилност, а рачните активности служат за фини корекции и санација на локални дефекти. Квалитетното изведување на овие работи е клучно за задржување на правилната положба на колосекот, намалување на динамичките влијанија и забавување на деградацијата на геометријата. На тој начин се обезбедува основа за сигурна експлоатација и релевантно мерење на состојбата на колосекот, што е предмет на следното поглавје.

4. МЕРЕЊЕ НА ГЕОМЕТРИСКАТА СОСТОЈБА НА КОЛОСЕКОТ НА ПРУГАТА ВРБНИЦА – БАР

Институциите за управување со железничката инфраструктура во сите европски држави се обврзани редовно да спроведуваат инспекција, мерења и техничко-дијагностички испитувања на елементите на железничкиот систем. Целта на овие активности е да се утврди фактичката состојба на објектите и опремата на пругата и да се обезбедат податоци врз основа на кои се носат одлуки за продолжување на експлоатацијата, преземање превентивни мерки или отпочнување со санациони работи. Собраните податоци претставуваат основа за анализа на геометриската стабилност и безбедност на колосекот, како и за планирање на идните активности за одржување.

Контролата на сите елементи од горниот строј може да се изведе визуелно или со употреба на специјализирани инструменти за мерење. Редовното испитување на геометриската состојба на пругите, најчесто се спроведува со мерни коли, кои овозможуваат автоматизирано мерење на сите релевантни параметри на колосекот. Овие мерења се основа за планирање на механичко регулирање, корекција на ширината и надвишувањето, подбивање на прагови и утврдување на безбедна брзина на сообраќајот.

Железничка инфраструктура на Црна Гора (ŽICG) не располага со сопствена мерна кола, поради што се врши годишно ангажирање преку јавна набавка. Овој пристап економски е оправдан, имајќи предвид дека железничката мрежа на Црна Гора е со ограничена должина (околу 330 km), а мерењата се изведуваат најмногу три пати годишно. Поради тешкотии во обезбедување соодветна мерна кола (неисправност на достапните возила или недостиг на понудувачи од соседните земји), ŽICG во април 2018 година набави прецизни електронски уреди од Франција, кои овозможуваат рачно мерење на геометријата на колосекот. Овие уреди снимаат исти параметри како и мерната кола, со исклучок на стабилноста на колосекот, и од октомври 2020 година редовно се користат на делницата Братоножиќи – Подгорица.

Според Упатството 339 за единствени критериуми за контрола на состојбата на колосекот [73], фреквенцијата на мерењата зависи од категоријата и експлоатационата брзина на пругата:

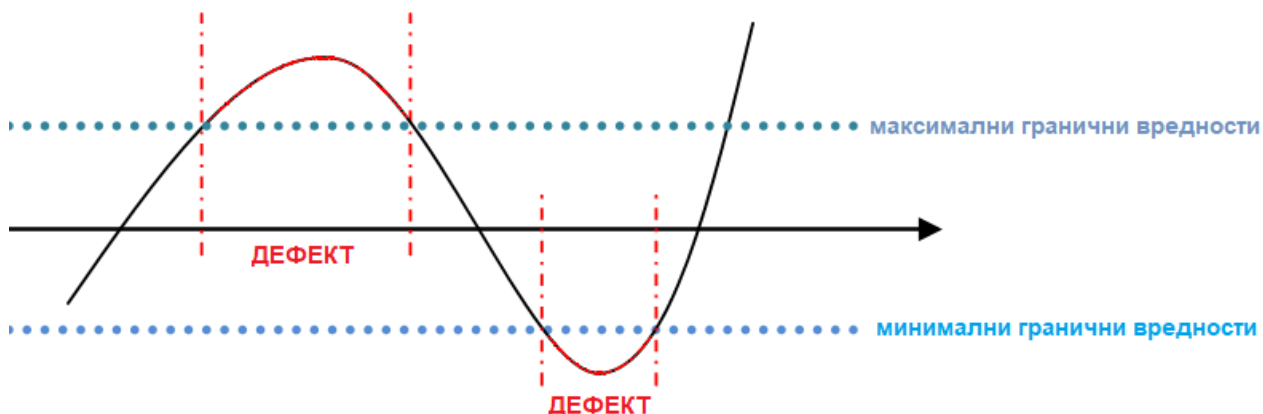
- На пруги со брзини од 120 km/h до 160 km/h четири пати годишно, со тоа што помеѓу поединечните мерења ќе има не помалку од два и пол, ниту повеќе од три и пол месеци;
- На сите магистрални пруги за брзини до 120 km/h, најмалку два пати годишно (пролет и есен), со растојание од најмалку четири месеци помеѓу поединечните мерења;
- На сите други железници во јавен сообраќај и на индустриски пруги по кои сообраќаат влечните возила на железничките оператори, најмалку еднаш годишно (во пролет или есен).
- При редовните тестови се оценува и состојбата на колосекот.

Мерењата не се вршат при температури пониски од -5°C или повисоки од $+40^{\circ}\text{C}$; доколку овие услови настапат за време на мерењето, процесот се прекинува сè додека не се воспостават дозволените температурни граници [73].

За пругата Врбница – Бар, на територијата на Црна Гора, мерењата на геометриската состојба на колосекот се изведени во повеќе последователни години. За да се оцени состојбата на колосекот, се мерат следните параметри:

- Ширина на колосек – растојанието помеѓу внатрешните површини на главата на шините, измерено 14 mm пониско од врвот на главата на шината,
- Надвишување – разлика во висината на главите на шините во еден пресек,
- Витоперење – разлика во витоперење,
- Смер/насока на колосек (Л и Д) – хоризонтално отстапување на главата на шината од основната линија (долга 10 m) мерено независно за двете шини,
- Дефекти во надолжен профил (Л и Д) – вертикално отстапување на шината од средната вертикална положба (т.е. од референтната линија). Се мери независно за двете шини.

Кога некој од измерените параметри ја надмине пропишаната гранична вредност, се смета дека на тој дел од трасата постои дефект (Слика 32). Во такви случаи се преземаат корективни мерки – подбивање, стабилизација или замена на оштетени елементи – со цел воспоставување на геометриската правилност и безбедност на колосекот.



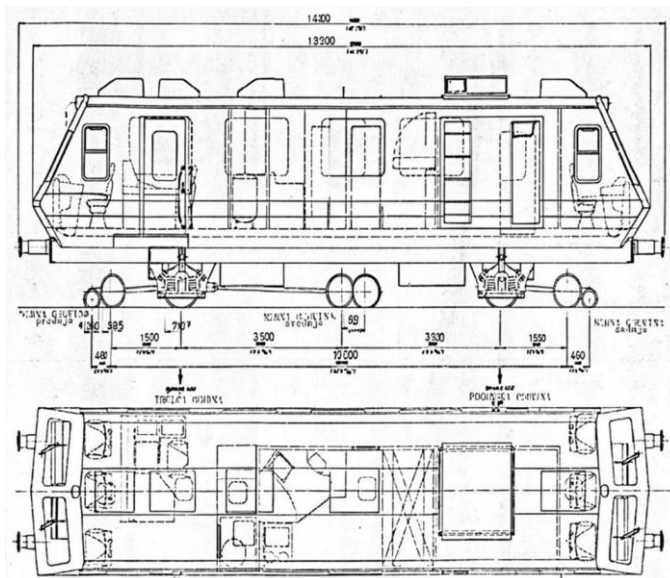
Слика 32. Дефект на измерениот параметар

Придржувањето кон пропишаните стандарди и периодичноста на мерењата овозможуваат навремено откривање на геометриски неправилности, рационално планирање на одржувањето и намалување на ризикот од дефекти што можат да предизвикаат прекини во сообраќајот или безбедносни инциденти.

4.1. Работи за одржување на горниот строј на железничката пруга Врбница – Бар

За мерење на геометријата на колосекот на пругите на територијата на Црна Гора, во 2017 година склучен е договор за изнајмување на возило (мерна кола) во сопственост на “Инфраструктура железнице Србије а.д.”. Мерната кола е од типот EM 80L која се користи за електронско мерење на геометријата на трасата, односно собира висококвалитетни и брзи податоци поврзани со геометриските параметри на трасите на железничките линии. Мерната кола врши контактно мерење на параметрите на геометријата на колосекот.

Возилото EM-80L е самоодно возило со две оски (една оска за движење и една погонска оска). Габаритните димензии на мерната кола, позициите на осовините и меѓусебните растојанија се дадени на слика 33.



Слика 33. Мерна кола EM 80L, за мерење на параметри на геометрија на колосек (Извор: [73])

Мерната кола EM-80 L опремена е со компјутер - анализатор, во кој се внесуваат податоци од различни параметри пред почетокот на секое мерно возење, а заради правилно функционирање на програмата (насока на движење, зголемување на почетната станица или намалување, датум на мерно возење, максимална брзина на пругата, надолжна скала, гранични вредности на поединечни параметри итн.) Сите анализи се вршат за усвоената должина од 1000 m, иако постои можност за избор на други должини.

Резултатите се добиваат во форма на графички и нумерички извештаи, кои овозможуваат преглед на состојбата на колосекот поединечно по параметар и по километар на трасата.

- Графички и нумерички извештаи

Графичките и нумеричките извештаи, прикажани на Слика 34, претставуваат основен извор за анализа и интерпретација на состојбата на колосекот.

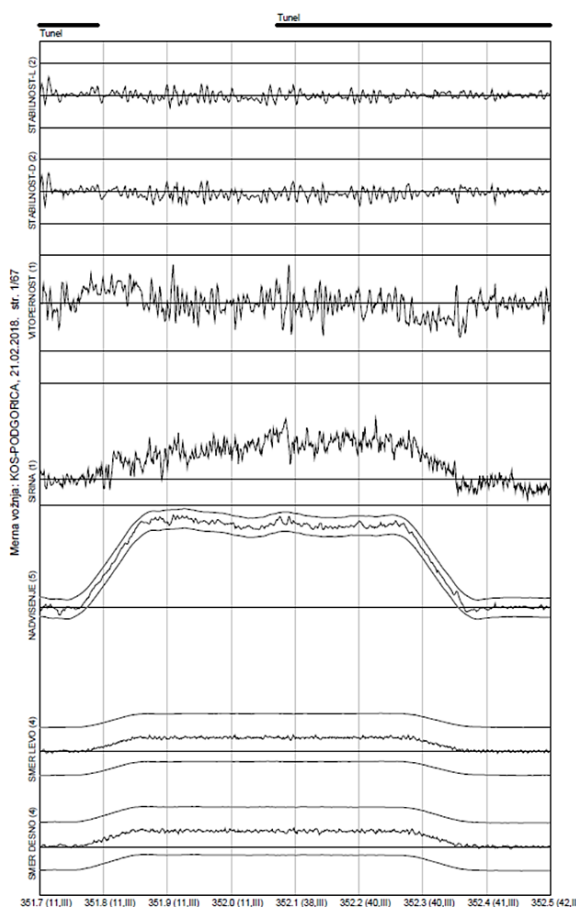
Овие извештаи ги обединуваат сите измерени податоци и овозможуваат комплетен преглед на геометријата на трасата по должина, со јасно означени отстапувања и карактеристични делови од инфраструктурата.

Графичките извештаи овозможуваат визуелна анализа на параметрите (ширина на колосек, надвишување, витоперење, смер и стабилност на шините) преку континуирани линии што ја претставуваат промената на секој параметар во функција на стационажата.

На овој начин, инженерите можат лесно да ги идентификуваат зоните каде што доаѓа до отстапувања од дозволените гранични вредности, без потреба од непосредна теренска проверка.

Зоните со неправилности се означени со карактеристични симболи или промена на боја, што овозможува визуелно издвојување на критичните делови.

Дополнително, на графиконите се прикажани и референтните објекти долж трасата (на пр. тунели, мостови, премини, станици), со што се овозможува просторна поврзаност меѓу дефектите и инфраструктурните елементи.



Слика 34. Графички и нумерички извештај од мерење на геометријата на колосекот со мерна кола EM 80L

Нумеричките извештаи претставуваат табеларен преглед на измерените вредности, во кој се наведуваат точните локации (километража), големината на отстапувањата и категоријата на дефектот (A, B, C или D).

Овој формат овозможува прецизно квантитативно оценување на состојбата и брзо споредување на различни параметри по должина на пругата.

Податоците се групирани по километар и за секој параметар се наведува бројот и должината на дефектите, што овозможува лесна интеграција во системите за планирање на одржувањето.

Ваквиот пристап ја зголемува објективноста во донесувањето одлуки, бидејќи дефектите се документирани со точна просторна и вредносна идентификација.

Комбинираната примена на графичките и нумеричките извештаи, овозможува сеопфатна проценка на геометриската состојба на пругата, графичките податоци служат за визуелно откривање на критичните зони, а нумеричките – за аналитичка потврда и приоритизација на интервенциите.

Овој двоен систем претставува основа за дефинирање на приоритетите во плановите за одржување и рехабилитација на трасата, како и за следење на ефектите од претходно извршените интервенции.

- Класификација на дефекти

Состојбата на колосекот се оценува врз основа на вкупната должина на грешките во групите В, С и D во должина од еден километар.

Состојбата на еден километар колосек може да биде многу добра, добра, задоволителна или незадоволителна, во зависност од вкупната должина на грешките во метри, имено:

- Многу добро, до 20 m грешки во групата В и 10 m грешки во групата С, без грешки во групата D, 20/10/0 (B/C/D);
- Добро, до 100 m грешки во групата В, до 30 m грешки во групата С, без грешки во групата D, 100/30/0 (B/C/D);
- Задоволително, до 100 грешки во групата С и без грешки во групата D, 100/0 (C/D);
- Незадоволително, повеќе од 250 m грешки во групата С и повеќе од 5 грешки во групата D, кои се од различни карактеристики на патеката, на меѓусебно растојание од повеќе од 50 m, или 3 од овие грешки на растојание до 30 m, 250/5(3) (C/D) [73].

```
Str. 1 KOS-PODGORICA, 21.02.2018.

-----
PARAMETER START END LEN(M) VALUE DIST THRES L S
-----
=====TOTAL PLANIRANJE RADOVA=====
START END TAMP LINE TQI GAUGE BAL
KM/M KM/M SPD 126 186 200 246 161
351.700 405.092 60 65 136 112 162 -58
OPT SPD 123 222 [137] 175 44

<<<TOTAL SUMMARY>>> KM 351.700 TO 405.092 = 53550M

=====A=====B=====C=====
PARAMETER LEN(M) #DEF LEN(M) #DEF LEN(M) #DEF
STABILNOST-L 3287 989 509 179 4 1
STABILNOST-D 5278 1118 1998 270 0 0
SMER-LEVO 17 4 2 1 0 0
SMER-DESNO 46 10 3 1 0 0
PROSIRENJE 16475 912 55 19 4 2
SUZENJE 2971 758 1280 393 4 2
NADVISENJE 3665 946 604 187 4 2
NADV. > 150mm 12 2 12 2 12 2
VITO. 3.5m 2187 770 358 152 9 4
TOTAL 24996 5509 4296 1204 37 13

<<<TOTAL STANJE PRUGE>>>
=VRLO DOBRO=====DOBRO=====ZAD=====NEZAD=====
351700 352000 353000 354000 354000 355000
352000 353000 356000 357000 356000 357000
354000 355000 357000 358000 357000 358000
355000 356000 358000 359000 405000 405092
360000 361000 359000 360000
361000 362000 362000 363000
365000 366000 363000 364000
366000 367000 364000 365000
370000 371000 367000 368000
371000 372000 368000 369000
372000 373000 369000 370000
373000 374000 378000 379000
374000 375000 379000 380000
375000 376000 381000 382000
376000 377000 386000 387000
377000 378000 387000 388000
380000 381000 388000 389000
382000 383000 389000 390000
383000 384000 390000 391000
384000 385000 391000 392000
385000 386000 395000 396000
392000 393000 399000 400000
393000 394000 400000 401000
398000 399000 402000 403000
401000 402000 404000 405000
403000 404000
-UKUPNO[m]-----
0 25300 25050 3092
=====
```

Слика 35. Збирен извештај за оценка на состојбата на колосекот

Мерната кола EM 80L, како посебен извештај, генерира збиен извештај за евидентирани дефекти на колосекот, за секој километар од пругата, и оцена за состојбата на колосекот врз основа на бројот на евидентирани грешки. Овој извештај ја прикажува должината на колосекот во набљудуваниот дел од пругата со дефинирана должина (анализа на колосекот на секој 1 km) каде што се надминати граничните вредности на еден или повеќе измерени параметри за дадената категорија на железница. Податоците се прикажуваат за секој измерен параметар и за секоја подгрупа на грешки ("A", "B", "C" и "D"), а се прикажува и бројот на регистрирани грешки за секој параметар и нивната вкупна должина. Извештајот е прикажан на слика 35.

Во делот “TOTAL SUMMARY” прикажани се вкупните должини на кои се јавуваат надминувања во разгледуваната должина на пругата (делница со должина од 1 km). Овие податоци се користат за оценка на состојбата на колосекот.

На крајот од овој извештај, сумирани се бројот на грешки и должините на кои тие се јавуваат, за секој измерен параметар, како и вкупниот број на грешки и должината на пругата со евидентирани грешки за сите параметри по дефинирани подгрупи A, B, C и D за целата разгледувана делница со должина од 1 km. Врз основа на ваквиот начин на сумирање на измерените грешки, следно се оценува состојбата на пругата, за секој километар од пругата.

Според Упатството 339 за единствени критериуми, за контрола на состојбата на колосекот, границите кои се користат за дефекти, откриени од системот за мерење на геометријата на трасата кои бараат итно планирање на работи за одржување (група C) прикажани се во следната табела:

Табела 21. Гранични вредности на параметрите за геометрија на колосек за евиденција на грешки од C категорија

	max	min
Стабилност на шина Л/Д [mm]	+20	-20
Ширина на колосек [mm]	+30	-5
Надвишување	снимена вредност	
Разлика во надвишување [mm]	+10	-10
Витоперење [mm]	+14	-14
Смер/Насока на колосек [mm]	+30	-30

- Резултати од мерењата и анализа

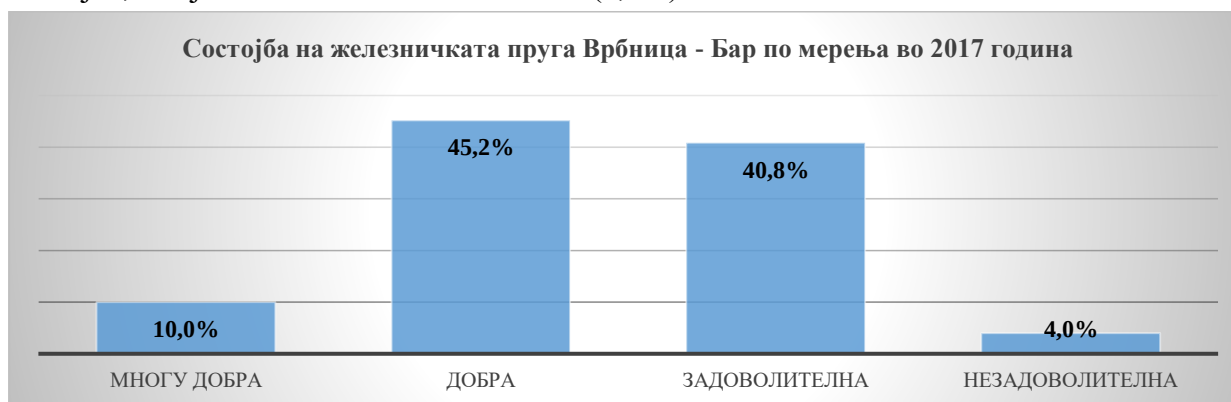
Врз основа на зададените вредности за гранични елементи и податоците кои ги дава мерната кола направена е анализа за состојбата на пругата Врбница – Бар (после мерењата направени во 2017 година).

Од табела 22, може да се забележи дека на 45.5% од вкупната должина на железничката пруга Врбница – Бар, измерени се грешки кои се класифицираат во категорија A (вредности до кои не е неопходно да се планираат и вршат корективни операции за одржување). На 7.3% од вкупната должина на пругата измерени се грешки кои се класифицираат во категорија B (дефекти кои бараат планирање на корективни операции за одржување) и на 0.1% од вкупната должина на трасата евидентирани се грешки кои се класифицираат во C категорија (дефекти кои бараат итно планирање на работи за одржување). Грешки кои се класифицираат во група D не се измерени.

Табела 22. Евидентирани грешки на пругата Врбница – Бар

	А		В		С	
	должина [m]	број на грешки	должина [m]	број на грешки	должина [m]	број на грешки
стабилност на шина Л	8.941,00	2611	1.505,00	527	21,00	8
стабилност на шина Д	11.699,00	2961	3.082,00	650	10,00	4
смер/насока Л	50,00	10	2,00	1	0,00	0
смер/насока Д	123,00	29	3,00	1	0,00	0
ширина на колосек (проширување)	30.756,00	2789	65,00	22	4,00	2
ширина на колосек (стеснување)	11.845,00	2721	5.689,00	1565	75,00	35
надвишување	8.754,00	2093	1.281,00	372	17,00	7
надвишување>150mm	31,00	5	31,00	5	31,00	5
витоперење 3.5m	4.295,00	1494	612,00	256	30,00	13
Вкупно	76.494,00	45,8%	12.270,00	7,3%	188,00	0,1%

Врз основа на вака измерените и класифицирани параметри за нерегуларности во геометријата на колосекот, дефинирана е состојбата на пругата после мерењата направени во 2017 година. Односно, врз основа на вкупната должина на грешките класифицирани во групите В, С и Д во должина од еден километар, се дефинира состојбата на пругата како многу добра, добра, задоволителна или незадоволителна. На графикот на слика 36 прикажани се финалните резултати, после извршените пресметки за да се дефинира состојбата на железничката пруга. Најголем дел од пругата, 45,2% се класифицира во добра состојба, а најмал дел во незадоволителна (4,0%).



Слика 36. Состојба на железничката пруга Врбница – Бар според измерените параметри за геометрија на колосек во 2017 година

Мерењата извршени со мерната кола ЕМ 80L во 2017 година обезбедија прв систематизиран и квантитативен увид во геометриската состојба на пругата Врбница – Бар. Контактниот систем на мерење овозможи прецизна евиденција на сите клучни параметри и постави референтна основа за идните мерења во 2019, 2022 и 2024 година. Резултатите потврдуваат дека пругата е во генерално стабилна техничка состојба, а регистрираните неправилности се од локален карактер и може да се санираат во рамки на редовните активности за одржување. Овие мерења претставуваат почетна точка за долгорочно следење на деградацијата на геометријата на колосекот и развој на предиктивни модели за анализа на TQI.

4.2. Мерења извршени во 2019 година со мерна кола EM 120 – Plasser & Theurer

За мерење на геометријата на колосекот на пругите на територијата на Црна Гора, во 2019 година склучен е договор за изнајмување на мерна кола во сопственост на „ТИНСА ООД Софија“. Мерната кола од типот EM 120, произведена од австриската компанија Plasser & Theurer, претставува специјализирано возило за високопрецизно мерење на геометријата на железничкиот колосек. Ова возило е дизајнирано да врши мерења во реално време при брзини од 0 до 120 km/h, овозможувајќи ефикасно и точно следење на состојбата на пругите.

Компанијата TINSA EOOD, со седиште во Софија, поседува модернизирана верзија на оваа мерна кола. Таа е опремена со бесконтактни инерцијални системи за мерење, во согласност со стандардот EN 13848 и националните прописи. Системот е инсталиран на возило со стандардна ширина на колосек од 1435 mm и се состои од два пара оптички уреди и инерцијална мерна единица (IMU). Овие компоненти овозможуваат генерирање на геометриски профили на шините и мерење на пет основни параметри:

- ширина на колосекот,
- стабилност (надолжно ниво) на секоја шина,
- витоперење на колосекот,
- смер/насока на колосекот,
- надвишување на колосекот.



Слика 37. Мерна кола EM 120, сопственост на ТИНСА ООД Софија

Мерењето се изведува со комбинација од бесконтактни методи, оптички сензори и инерцијални системи.

Бесконтактното мерење овозможува ласерските и оптичките уреди да го регистрираат профилот на шините и нивната геометриска состојба, додека инерцијалните системи, кои вклучуваат жироскопи и акцелерометри, ја следат положбата на шините во простор.

На овој начин се обезбедува мерење на сите параметри на колосекот со висока точност, вклучително и стабилноста, витоперењето и насоката на шините. Покрај тоа, се користат прецизни сензори за ширина на колосекот, кои ја мерат дистанцата помеѓу шините со микрометарска точност.

Сите податоци се снимаат во реално време преку интегриран компјутерски систем. Возилото има две управувачки позиции, што овозможува мерење во двете насоки на движење.

Во секоја контролна станица постои тастатура за рачна регистрација на дополнителни податоци (како свртници, патни премини, мостови, тунели и други објекти), како и за корекција на стационажа.

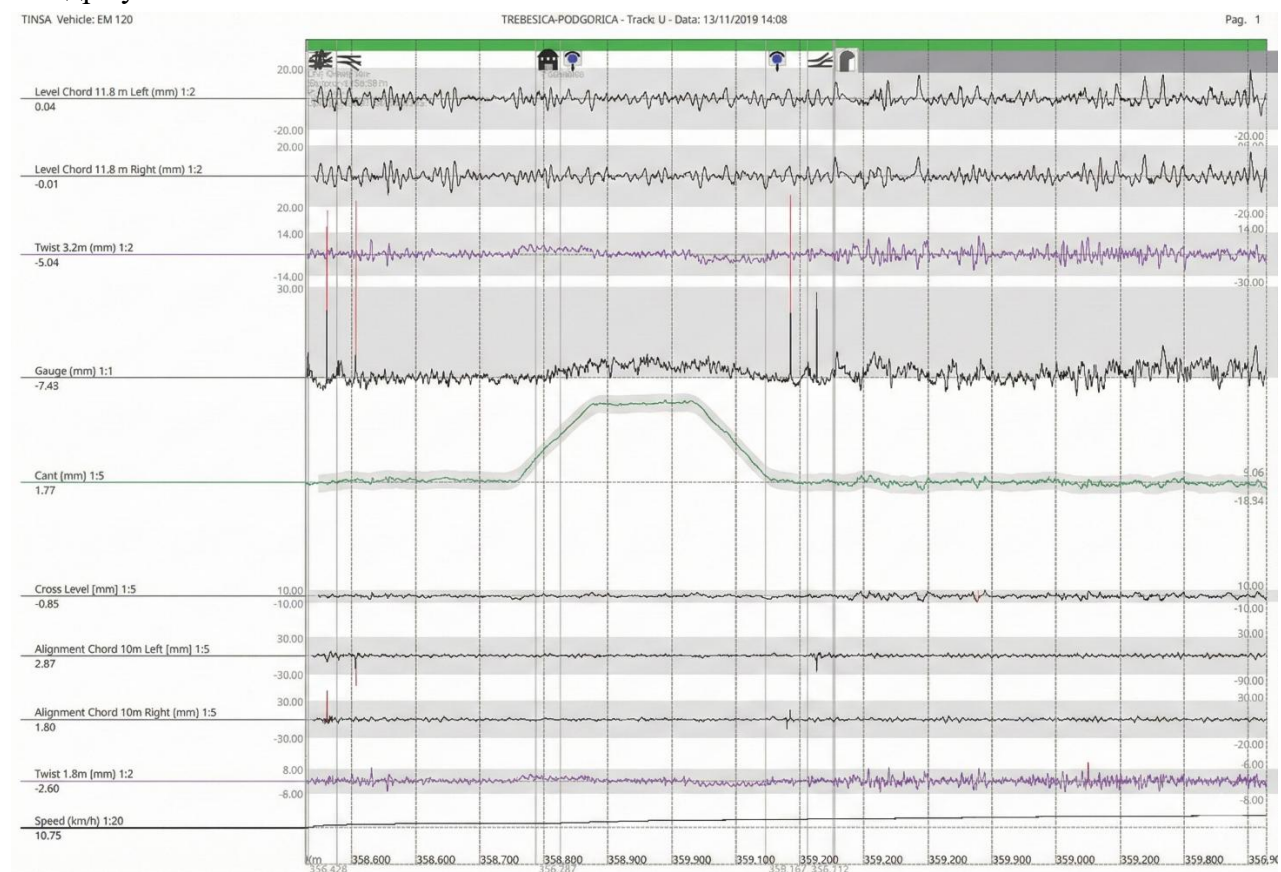
Мерењето се врши со мерни осовини, кои овозможуваат континуирана регистрација на параметрите со висока стабилност и точност [107].

По завршувањето на мерењата, собраните податоци се обработуваат со специјализиран софтвер, кој овозможува анализа и споредба со стандардите. Овој процес резултира со генерирање на графички и нумерички извештаи, кои обезбедуваат детален приказ на состојбата на железничкиот колосек.

Извештаите претставуваат основа за идентификација на дефекти, дефинирање на приоритетни зони за одржување и обезбедување на безбедност на железничкиот сообраќај.

- Графички извештаи

Графичките извештаи овозможуваат суперпонирање на повеќе параметри, што овозможува истовремено прикажување на различни аспекти на состојбата на железничкиот колосек, како што се ширина, витоперење и надолжен профил. Оваа можност значително ја подобрува компаративната анализа на параметрите, овозможувајќи препознавање на корелации и трендови меѓу различните видови дефекти. Така се добива подлабоко разбирање на состојбата на инфраструктурата, што придонесува за поефикасно планирање на одржувањето.



Слика 38. Графички извештај од мерење на геометријата на колосекот со мерна кола EM 120

Примена на графичките извештаи овозможува ефикасна дијагностика, планирање на одржувањето и превентивно следење на состојбата на железничкиот колосек. Во делот на

дијагностиката, графичките извештаи овозможуваат брзо визуелно препознавање на критичните точки на трасата, при што зоните што бараат итна интервенција се јасно означени. При планирањето на одржувањето, извештаите овозможуваат приоритетно насочување на ресурси и активности кон зоните со забележани дефекти, како и прецизно дефинирање на областите каде што се потребни корективни активности. Превентивното следење, пак, се потпира на редовно споредување на графичките извештаи од различни временски периоди, со цел да се следи прогресот на дефектите и да се спречат поголеми проблеми преку навремени интервенции.

Дијагностиката преку графичките извештаи овозможува брзо идентификување на проблематичните делови на трасата, со наведување на конкретни локации за интервенција, претставени преку координати или ознаки на километри:

- зоните означени со „црвена“ боја се приоритетни за итна поправка,
- зоните во „жолта“ боја се планираат за следење и можна корекција при следните активности за одржување.
- зелените зони, се наменети за долгорочно следење и планирање на одржувањето.

Бојната кодираност носи значајни придобивки, како што се јасната визуелизација, која овозможува лесно идентификување на проблематичните зони без потреба од детална анализа на нумеричките податоци. Ова придонесува за ефикасно планирање, обезбедувајќи брз и систематски пристап кон одржувањето, како и за навремени интервенции кои го минимизираат ризикот од несреќи и дополнителните трошоци за поправки.

- Нумерички извештаи

Нумеричките извештаи (Слика 39) претставуваат основен извор на детални податоци за резултатите од мерењето на геометријата на колосекот. Тие обезбедуваат прецизен табеларен приказ на сите измерени параметри и нивните отстапувања во однос на дефинираните граници на толеранција.

За секоја забележана неправилност, извештајот прикажува конкретна стационожа на почеток и крај на дефектот, должина на засегнатиот сегмент, максимална вредност на отстапување, како и праг на дозволена толеранција (THR) за тој параметар. Паралелно се прикажани и географските координати (GPS) на локацијата, што овозможува прецизна просторна идентификација на секој дефект на терен.

Вообичаено, извештајот содржи следниве колони:

- ID – идентификационен број на дефектот или записот,
- VALID – статус на дефектот (дали е валиден, односно потврден како реално отстапување),
- DESCRIPTION – опис на видот на дефектот или параметарот (на пример: Speed Restriction, Twist Defect, Alignment Defect, Gauge Narrow, итн.),
- FROM / TO – почетна и крајна стационожа на дефектот (во километри и метри),
- LENGTH – должина на сегментот со отстапување,
- MAX VAL – највисока забележана вредност на отстапувањето (во mm или mrad),
- THR – дозволен праг (толеријата) за параметарот, дефиниран според стандардите,
- MAX LOC – точна локација на најголемото отстапување,
- GPS AT MAX VAL – географски координати на позицијата со највисока регистрирана вредност.

Defect Report										
Measure: 201911131408_TREBESICA-PODGORICA										
File: 201911131408_TREBESICA-PODGORICA.TGMS.pdf										
Date tested: 2019-11-13										
Start Location: TREBESICA										
End Location: PODGORICA										
Line Name: 1										
ID	VALID	DESCRIPTION	P	FROM Km	TO Km	LENGTH m	MAX VAL mm in deg	THR mm in deg	MAX LOC	GPS AT MAX VAL
1	0	Speed [Value: 80 km/h]		358.428						19.476395/19.476
		New Track ID		358.428						19.476431/19.476
		Switch Left		358.432						19.476380/19.476
		Difference Alignment Chord 10 m Right Defect	C	358.468	358.478	10.000	-49.580	-35.000	358.478	19.476301/19.476
2	0	Switch Right		358.478						19.476272/19.476
		Difference Alignment Chord 10 m Left Defect	C	358.513	358.523	10.250	-51.567	-35.000	358.513	19.476218/19.476
		Curve [Type: Right Initial Spiral]		358.693						19.475769/19.476
		Station [Name: Trebesica]		358.788						19.475665/19.476
		Signal		358.826						19.475460/19.475
		Curve [Type: Right Curve; Radius: 300 m]		358.898						19.475076/19.475
		Curve [Type: Right Final Spiral]		359.030						19.473985/19.474
		Signal		359.147						19.473947/19.473
		Curve [Type: Final Spiral End]		359.174						19.472407/19.472
		Switch Left		359.212						19.471992/19.472
		Switch Right		359.253						19.471534/19.472
		Tunnel		359.255	364.576	5321.360				19.471866/19.472
3	0	Cross Level Defect	C	359.488	359.489	1.000	-11.486	-10.000	359.488	-7000000000.000000/-7000000000.000
4	0	Twist 1.8m Defect	C	359.661	359.662	1.000	12.407	8.000	359.661	-7000000000.000000/-7000000000.000
5	0	Cross Level Defect	C	359.942	359.961	19.000	-10.876	-10.000	359.943	-7000000000.000000/-7000000000.000
9	0	Twist 1.8m Defect	C	360.052	360.073	21.000	15.183	8.000	360.070	-7000000000.000000/-7000000000.000
7	0	Cross Level Defect	C	360.053	360.072	19.250	24.400	10.000	360.070	-7000000000.000000/-7000000000.000
10	0	Twist 9m Defect	C	360.066	360.075	9.250	-26.395	-23.800	360.075	-7000000000.000000/-7000000000.000
13	0	Twist 1.8m Defect	C	362.584	362.587	2.250	-8.440	-8.000	362.587	-7000000000.000000/-7000000000.000
14	0	Twist 1.8m Defect	C	364.102	364.103	1.250	-9.165	-8.000	364.102	-7000000000.000000/-7000000000.000
		Curve [Type: Left Initial Spiral]		364.576						19.469919/19.470
		Tunnel		364.600	364.680	79.376				19.469919/19.470
		Curve [Type: Left Curve; Radius: 702 m]		364.683						19.469919/19.470
		Tunnel		364.711	364.733	22.069				19.469919/19.470
		Tunnel		364.760	364.837	77.794				19.469919/19.470
		Tunnel		364.902	364.952	49.476				19.469919/19.470
		Curve [Type: Left Final Spiral]		365.015						19.469919/19.470
		Cross Level Defect	C	365.038	365.041	3.000	-13.385	-10.000	365.039	-7000000000.000000/-7000000000.000
		Curve [Type: Final Spiral End]		365.102						19.469919/19.470
		Tunnel		365.169	365.508	339.224				19.469919/19.470
		Twist 1.8m Defect	C	365.359	365.360	1.000	-12.223	-8.000	365.359	-7000000000.000000/-7000000000.000
16	0	Curve [Type: Left Initial Spiral]		365.363						19.469919/19.470
		Twist 1.8m Defect	C	365.445	365.463	18.000	-9.912	-8.000	365.462	-7000000000.000000/-7000000000.000
17	0	Gauge Defect	C	365.494	365.496	2.250	37.075	30.000	365.495	-7000000000.000000/-7000000000.000
18	0	Curve [Type: Left Curve; Radius: 350 m]		365.501						19.469919/19.470
		Cross Level Defect	C	365.513	365.515	1.750	-11.601	-10.000	365.514	-7000000000.000000/-7000000000.000
19	0	Tunnel		365.581	365.896	315.150				19.469919/19.470

Слика 39. Нумерички извештај од мерење на геометријата на колосекот со мерна кола EM 120

Овој тип на извештај овозможува брза и систематска проценка на состојбата на колосекот.

Со оглед дека сите податоци се прикажани во нумерички формат, тие овозможуваат:

- квантитативна анализа на големината и фреквенцијата на дефектите,
- статистичка обработка (на пример пресметка на средни вредности, стандардни девијации и индекси на квалитет),
- автоматизирано филтрирање и сортирање според тежина, должина или локација на отстапувањата,
- комбинирање со графички извештаи за целосна просторна интерпретација на дефектите, и
- поддршка при донесување на одлуки за приоритетно одржување.

Нумеричките извештаи претставуваат основа за изработка на статистички индикатори за состојбата на пругата, како што се индексот на квалитет на колосекот (TQI), процентот на дефектни сегменти и просечната стапка на геометриска деградација.

Овие податоци, во понатамошната анализа, служат како влезни параметри за моделирање, прогнозирање и оптимизација на одржувањето на колосекот, што ја потврдува нивната клучна улога во методологијата за истражување.

4.3. Мерења извршени во 2022 и 2024 година со мерна кола Sever 1435

Во 2022 и 2024 година за потребите на мерење на геометријата на колосекот на пругите на територијата на Црна Гора, извршено е снимање со мерна кола од типот Sever 1435, во сопственост на „Инфраструктура железнице Србије а.д.“. Мерната кола

функционира според принцип на бесконтактно мерење и претставува современ систем за дијагностика на колосечката геометрија со висока точност и стабилност на резултатите.

Бесконтактниот мерен систем од типот SOKOL, инсталиран на возилото, овозможува мерење на сите релевантни параметри на геометријата на колосекот при брзини од 0 до 250 km/h. Системот користи инерцијална навигациона единица (IMU – Inertial Measurement Unit) за прецизно следење на положбата и ориентацијата на мерната кола во просторот, со што се добива тродимензионален опис на положбата на шините во реално време [108].

IMU системот ја одредува својата почетна позиција и брзина со користење на GPS-приемник или внесена почетна координата, а потоа преку интеграција на сигналите од акцелерометрите и жироскопите ги следи сите промени во движењето. На тој начин се регистрираат транслаторни и аголни отклонувања, што овозможува целосна реконструкција на просторното движење на шините [108].



Слика 40. Мерна кола EM 120 од типот Север, сопственост на Инфраструктура железнице Србије а.д.

4.3.1. Метод на снимање и обработка на податоците

За време на мерењето, сите резултати се прикажуваат на екранот на компјутерите во мерната кола, управувани од оператори. Приказот на податоците се одвива во речиси реално време, со минимално задоцнување (100–200 m) поради интерните пресметки. Сите снимени податоци автоматски се складираат во меморијата на системот и се достапни за понатамошна анализа.

Софтверот на системот овозможува пресметка на параметрите на геометријата на колосекот и идентификација на грешки преку споредба на измерените вредности со граничните дозволени вредности утврдени според стандардот EN 13848.

Овој стандард дефинира три нивоа на гранични вредности:

- AL (Alert Limit) – предупредувачка граница;
- IL (Intervention Limit) – граница на интервенција;
- IAL (Immediate Action Limit) – граница за итна интервенција.

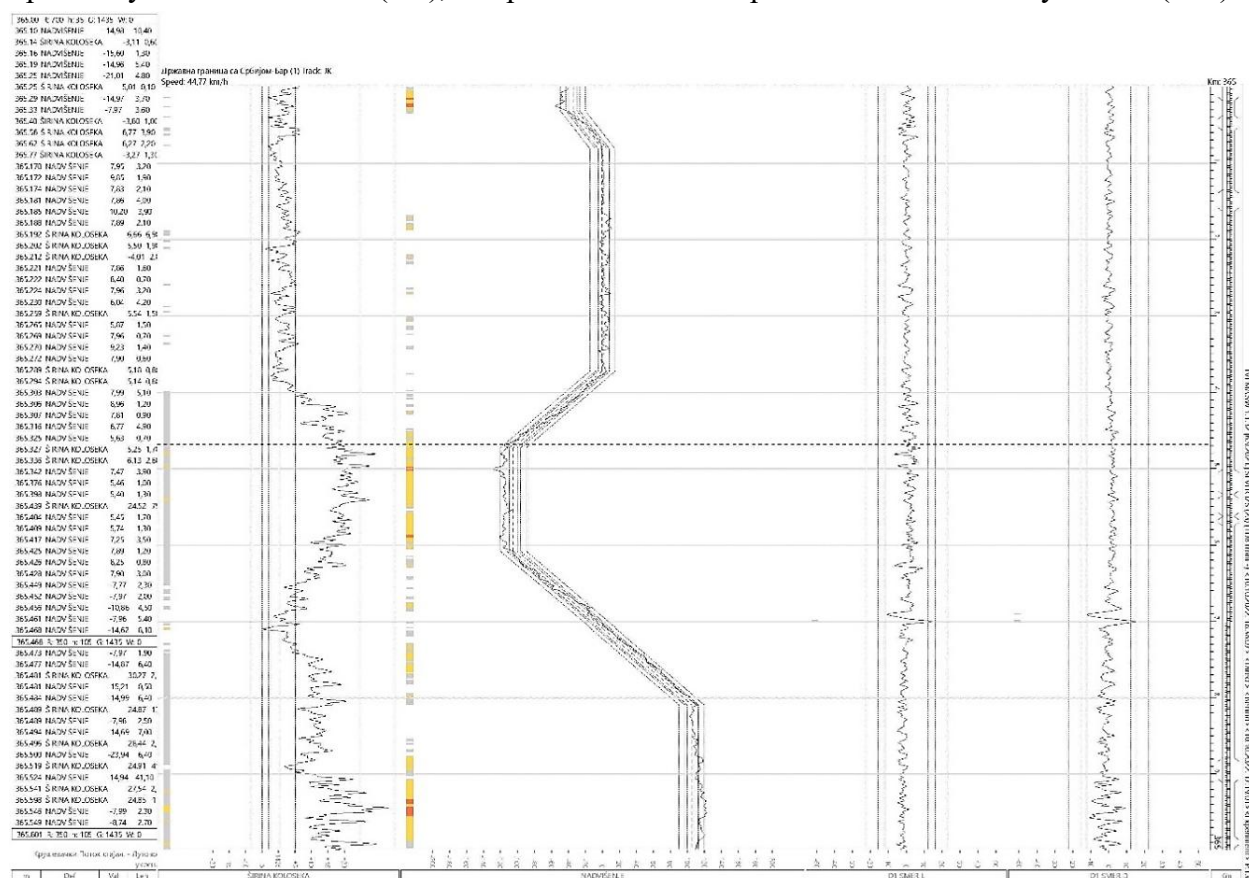
Преминувањето на последната граница (IAL) значи дека вредноста на измерениот параметар го надминува дозволениот максимум и бара итна реакција, привремено ограничување на брзината или затворање на делот од пругата до санација [108].

4.3.2. Извештаи добиени од системот Sever 1435

Мерниот систем Sever 1435 генерира три вида извештаи кои се користат за анализа на состојбата на колосекот: графички извештај, нумерички извештај и збиен (сумарен) извештај. Овие документи го прикажуваат мерењето од различни аспекти – визуелно, табеларно и статистички, со цел да се обезбеди целосен увид во геометриската состојба на пругата.

- Графички извештај

Графичкиот извештај (Слика 41) овозможува визуелно следење на параметрите на геометријата на колосекот по должина на трасата. На дијаграмот, хоризонталната оска ја претставува стационажата (km), а вертикалната оска вредностите на отстапувањата (mm).



Слика 41. Графички извештај од мерење на геометријата на колосекот со мерна кола од типот Sever

Во графикот, прикажани се повеќе параметри, како што се стабилност, смер/насока, витоперење, попречен наклон и ширина на колосекот.

Жолтите полиња означуваат отстапувања кои се во рамките на дозволените граници, додека црвените полиња прикажуваат делови со прекорачени вредности што бараат итна интервенција.

Ваквиот приказ овозможува:

- лесна идентификација на делници со зголемени отстапувања,

- проценка на стабилноста на колосекот во подолг временски интервал, и
- дефинирање на приоритети за активности на одржување.
- **Нумерички извештај**

Нумеричкиот извештај (Слика 42) претставува табеларен приказ на сите дефекти евидентирани при мерењето на геометријата на колосекот. Секој запис содржи податоци за почетната и крајната стационажа на дефектот, должината на делницата, максималното отстапување (MAX VAL), граница на толеранција (THR) и тип на дефектот, кој е класифициран според неговата сериозност.

#	Param	Start	End	Threshold	Extremum	Length	Degree	Class	Rec. Class	Speed	Rail Type
305 km 437 m Tunnel (End)											
546	NADVIŠENJE	305.442	305.450	15,00	21,08	7,60	GHI	1	0	80	49E1
547	NADVIŠENJE sred.	305.442	305.444	5,00	7,97	1,50	GU	1		80	49E1
548	NADVIŠENJE sred.	305.444	305.448	8,00	10,28	4,40	GI	1		80	49E1
549	NADVIŠENJE sred.	305.448	305.449	5,00	7,81	1,00	GU	1		80	49E1
550	NADVIŠENJE	305.450	305.459	8,00	14,83	9,60	GI	1		80	49E1
551	PROŠIRENJE	305.454	305.565	5,00	11,84	110,50	GU	1		80	49E1
552	NADVIŠENJE	305.459	305.461	5,00	7,99	1,90	GU	1		80	49E1
553	NADVIŠENJE	305.461	305.473	8,00	12,34	12,00	GI	1		80	49E1
554	NADVIŠENJE	305.474	305.476	5,00	7,96	2,30	GU	1		80	49E1
555	NADVIŠENJE	305.494	305.496	-5,00	-5,95	2,20	GU	1		80	49E1
556	NADVIŠENJE sred.	305.495	305.495	-5,00	-5,15	0,70	GU	1		80	49E1

Слика 42. Нумерички извештај за изолирани грешки на колосекот

Категоризацијата на дефектите е извршена според стандардизираните ознаки:

- GU – гранична вредност во зоната на предупредување,
- GI – гранична вредност во зоната на интервенција,
- GHI – гранична вредност во зоната на итна интервенција.

Во извештајот се наведени и дополнителни информации за карактеристиките на локацијата, како што се радиусот на кривината, типот на објект (на пример мост или тунел) и класата на пругата, што овозможува попрецизна интерпретација на резултатите.

Овој формат овозможува систематска и брза анализа на состојбата на поединечните делници, со можност за директна споредба на податоците од различни мерни кампањи (2017, 2019, 2022, 2024). Нумеричкиот извештај служи како основа за:

- идентификација на критични точки каде што е потребна санација,
- следење на повторливи дефекти на истите позиции низ повеќе мерења, и
- дефинирање на ограничувања на брзината или привремени мерки за стабилизација на колосекот.

Со ваквиот систематизиран приказ, нумеричкиот извештај претставува клучен извор на податоци за инженерска евалуација и планирање на активности за одржување.

- **Збирен (сумарен) извештај**

Збирниот извештај (Слика 46) претставува агрегирана табела со вкупните податоци за дефектите забележани по должината на трасата. Во него се прикажани должините и бројот на грешки по категории (GU, GI, GHI) и по тип на параметар, како што се стабилност, надвишување, проширување, попречен наклон и витоперење.

Овој извештај овозможува да се процени вкупната состојба на колосекот врз основа на должината и распределбата на дефектите во секоја класа. Во долниот дел од табелата е прикажана и оцената на состојбата на колосекот, изразена како „добра“, „задоволителна“ или „незадоволителна“, зависно од вкупниот број и сериозноста на отстапувањата.

Summary:

Param	GU		GI		GHI	
	Len, m	Count	Len, m	Count	Len, m	Count
PROŠIRENJE	106,70	37	0,00	0	0,00	0
SUŽENJE	41,30	7	0,00	0	0,00	0
D0 STABILNOST L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D0 STABILNOST D	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D1 STABILNOST L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D1 STABILNOST D	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D2 STABILNOST L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D2 STABILNOST D	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D0 SMER L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D0 SMER D	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D1 SMER L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D1 SMER D	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D2 SMER L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
D2 SMER D	0,00	0	0,00	0	0,00	0
NADVIŠENJE	102,40	18	8,40	2	0,00	0
NADVIŠENJE sred.	63,20	15	3,00	3	3,90	1
NADVIŠENJE max.	0,00	0	0,00	0	53,80	4
VITOPERNOST	0,00	0	0,00	0	0,00	0
VERT HABANJE L	10,20	8	0,00	0	0,00	0
VERT HABANJE D	11,30	7	0,00	0	0,00	0
BOČ HABANJE L	0,60	1	0,00	0	0,00	0
BOČ HABANJE D	0,70	1	0,00	0	0,00	0
ŠIRINA GLAVE ŠINE L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
ŠIRINA GLAVE ŠINE D	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Rail Head Wear L MM2	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Rail Head Wear R MM2	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Rail Head Wear % L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Rail Head Wear % R	0,00	0	0,00	0	0,00	0
RI L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
RI R	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Rail Lip L	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Rail Lip R	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Total	336,40	94	11,40	5	57,70	5
Oцена stanja koloseka	Nezadovoljavajuće					
TQC_STD	D					

Слика 43. Збирен (сумарен) извештај за грешки на колосекот

Збирниот извештај има практична вредност за инженерите и управителот на инфраструктурата, бидејќи овозможува:

- едноставно следење на вкупниот обем на дефекти по категории,
- споредба на состојбата меѓу различни години на мерење,
- идентификација на делници со зголемена концентрација на грешки, и
- основа за дефинирање на приоритети во плановите за одржување и санација.

Со оглед дека во него се содржани податоците за сите параметри, збирниот извештај претставува основен документ за синтетичка анализа на состојбата на трасата и за изработка на годишни или долгорочни планови за интервенции.

Врз основа на добиените извештаи од мерните кампањи, управителот на инфраструктурата може да формира планови за одржување на колосекот во зависност од приоритетите и можностите на теренот.

Вкупно земено, мерните коли EM 80, EM 120 и Sever 1435 претставуваат суштински инструменти за објективна евалуација на геометријата на колосекот и за следење на нејзините промени низ времето. Со нивната примена е обезбедена континуирана низа на мерења во повеќегодишен период, што овозможува споредливост на резултатите и анализа на долгорочните трендови на деградација.

Секоја од мерните коли има специфични технички предности:

- EM 80 како постар систем со механичко снимање и визуелен приказ на параметрите,

- EM 120 како понова генерација со дигитална обработка и висока просторна резолуција,
- Sever 1435 како современ бесконтактен систем кој користи инерцијална навигација (IMU) и GPS позиционирање.

Комбинирањето на податоците од овие системи обезбедува сеопфатен увид во состојбата на трасата – од локални неправилности до глобална оценка на квалитетот на колосекот. Таквиот интегриран пристап овозможува прецизно идентификување на делници со зголемена нестабилност, анализа на ефектите од извршените интервенции и дефинирање на приоритети за понатамошно одржување.

4.4. Поврзување на резултатите од мерењата со аналитичката обработка

Резултатите добиени со мерните коли EM 80, EM 120 и Sever 1435 претставуваат основен извор на податоци за оценување на состојбата на колосекот и ја формираат почетната база за понатамошна аналитичка обработка во рамките на докторскиот труд. Мерењата се изведени во согласност со стандардот EN 13848, со што е обезбедена усогласеност на параметрите, методологијата и критериумите за оценување на геометријата на колосекот.

Иако мерните коли припаѓаат на различни технолошки генерации, нивните резултати се споредливи, бидејќи се засноваат на истите референтни параметри: стабилност, смер/насока, попречен наклон, ширина на колосек, надвишување и витоперење. Мерната кола EM 80 претставува постар систем со аналогно снимање и визуелен запис на дијаграмите, кој овозможи прв континуиран увид во состојбата на трасата и создаде основа за развој на поновите технологии за мерење. EM 120 претставува понова генерација мерна кола со дигитална обработка на податоците и автоматско пресметување на параметрите на геометријата на колосекот според дефинирани толеранции. Со оваа технологија е обезбедена поголема прецизност на мерењата и побрза обработка на резултатите. Најсовремениот систем, Sever 1435, применува бесконтактен метод на мерење базиран на инерцијална навигација (IMU) и GPS синхронизација, што овозможува висока просторна прецизност и стабилност на резултатите, дури и при големи брзини на движење.

Со примената на овие три системи, обезбедена е унифицирана основа за анализа на состојбата на колосекот низ повеќе временски периоди (2017, 2019, 2022 и 2024 година). Од спроведените мерења, добиени се основните податоци за состојбата на колосекот во различни временски интервали, кои овозможуваат следење на трендовите на деградација и процена на ефектите од извршените интервенции на трасата. Податоците се дообработени, филтрирани и сумирани во Excel табела во форма на нумерички вредности, што овозможува нивна директна примена во статистичките анализи и модели за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI).

Со ваквиот пристап, воспоставена е конзистентна и споредлива база на податоци, која претставува основа за развој на аналитичките и моделски делови на трудот, анализа на деградација, процена на влијателни параметри, предвидување на индексот на квалитет на колосекот и оптимизација на активности за одржување.

5. ОПИС НА ПОДАТОЦИТЕ ВКЛУЧЕНИ ВО АНАЛИЗАТА

Во рамки на ова истражување, користени се обемни и репрезентативни теренски податоци добиени од мерења на геометријата на железничката пруга на делницата Колашин – Подгорица. Делницата претставува дел од стратешки важната железничка траса Врбница – Бар, која минува низ планински, геотехнички сложен терен со променлива надморска височина, бидејќи вклучува тунели, мостови, остри кривини и делници со голем надолжен наклон. Ваквите инженерски и експлоатациони карактеристики ја прават оваа делница посебно погодна за анализа на деградацијата на колосекот под реални, сложени сообраќајно-технички услови.

Мерењата се спроведени во четири независни временски циклуси: 2017, 2019, 2022 и 2024 година, со користење на специјализирано мерно возило кое ги исполнува барањата на европските стандарди EN 13848-1:2019 (Railway Applications – Track Geometry Quality – Part 1) и UIC Leaflet 518. Секое мерење е извршено во есенски период, под слични климатски услови, со цел да се минимизира сезонското влијание врз вредностите. Податоците од 2024 година не се користени за тренирање или оптимизирање на моделите, туку исклучиво за финална валидација на резултатите за предвидување. На тој начин се обезбедува објективност и доверливост на развиените модели.

Методолошкиот пристап во ова истражување е структуриран со цел да обезбеди доверливо и технички валидно предвидување на вредностите на индексот на квалитет на колосекот во 2024 година (TQI_{2024}), преку примена на напредни модели на машинско учење и статистичко моделирање. Анализата е спроведена врз основа на податоци добиени од мерења во 2017, 2019 и 2022 година, додека податоците од 2024 година се искористени исклучиво за тестирање и валидација на развиените модели.

5.1. Поделба на трасата на хомогени делници – стандардизирана методологија

За целите на деталната анализа на состојбата на колосекот, трасата Колашин – Подгорица е поделена на хомогени делници со должина од 20 метри. Овој избор не е произволен, туку се темели на повеќе технички, нормативни и методолошки основи, кои овозможуваат репрезентативна, но истовремено и статистички стабилна анализа на геометриските параметри на колосекот.

Поделбата на трасата на 20-метарски делници, направена е врз основа на следните причини:

- Во рамки на 20 метри нема значителни варијации на геометриските параметри на колосекот, што овозможува статистички репрезентативна анализа.
- Должината од 20 метри е усогласена со методологиите пропишани во меѓународните стандарди за оценка на квалитетот на колосекот EN 13848-1:2019 [109] и UIC 518 [110].
- Оваа должина го балансира компромисот помеѓу локалната прецизност и севкупниот тренд на деградација, што е особено важно при моделирање на TQI .
- Со оваа поделба се добива пообјективен приказ на состојбата на колосекот, бидејќи се елиминираат случајните локални аномалии што би можеле да го нарушат процесот на анализа.

Од практична гледна точка, поделбата на трасата во 20-метарски делници овозможува:

- Прецизна просторна идентификација на зони на деградација, со можност за дефинирање на приоритетни точки за одржување;
- Намалување на варијациите на геометриските параметри во рамки на секој сегмент, што овозможува пореалистично пресметување на статистички индикатори (σ_j) и минимизирање на ефектите од случајни флуктуации;
- Подобрување на ефикасноста и стабилноста на машинските модели, преку обезбедување на доволен број опсервации потребни за тренирање на алгоритмите и избегнување на прекумерна зависност на моделот од податоците за тренирање.

Техничката логика зад изборот на оваа должина потврдена е во европските и меѓународните стандарди. Според EN 13848-1:2019 [109], анализата на геометриските параметри се изведува со пресметка на статистички индикатори (стандардна девијација и средна вредност) врз фиксни сегменти наречени *recording length*, при што во пракса најчесто се применуваат должини од 10 m, 20 m и 200 m, зависно од целта на анализата.

Во контекст на идентификација на локализираните дефекти и анализа на деградација, 20-метарските сегменти претставуваат оптимален компромис меѓу прецизноста и стабилноста на мерењето, што се потврдува и во применетите методологии на UIC 518 [110].

Истражувањата од областа на инфраструктурното моделирање и анализа покажуваат дека изборот на должината на сегментот директно влијае на можноста за детекција на критични дефекти и стабилноста на статистичките индикатори. Примената на просторни мрежни модели 3D и техники за просторна апстракција и предвидување [111] дополнително ја потврдува важноста на хомогените сегменти при анализа на инфраструктурни системи. Овие пристапи покажуваат дека сегментите од 20 m обезбедуваат оптимален баланс меѓу просторната резолуција и стабилноста на податоците, особено во геометриски сложени делници, што е релевантно и за железничката инфраструктура [111].

Премногу долги сегменти (100–200 m) можат да ги „измазнат“ или прикријат екстремните вредности и локалните неправилности, додека прекратки (5–10 m) носат ризик од нагласување на несуштински варијации предизвикани од мерен шум, појава која е добро документирана во литературата за одржување според состојба [112], следење на конструктивната состојба [113], статистичко моделирање [114], методи на машинско учење [115] и техники за откривање на неправилности [116].

Како резултат, должината од 20 m се издвојува како оптимална мерна единица што обезбедува аналитичка резолуција и инженерска стабилност при реални експлоатациони услови.

Од аспект на трасата Колашин – Подгорица, дополнителен фактор за избор на 20 m е изразената геометриска и инфраструктурна разновидност долж пругата. Делниците опфаќаат тунели, мостови, остри кривини и стрмни наклони, при што е неопходна повисока просторна резолуција за да се опфатат локализираните ефекти на преодните зони, како што се нестабилност на засторот на излезите од тунели или при премини кон мостови.

Конечно, поделбата на 20 m овозможува структурирање на податоците во технички оптимални единици погодни за статистичка анализа, визуелизација и моделирање на процесите на деградација. Таа должина е доволно кратка за да се регистрираат локални промени, но и доволно долга за да се избегне прекумерна чувствителност на шум и инструментални варијации.

На тој начин, примената на 20-метарска хомогена сегментација обезбедува методолошка конзистентност, меѓународна усогласеност и инженерска применливост, што ја прави соодветна за предиктивно моделирање на квалитетот на колосекот во геометриски сложени средини како што е коридорот Колашин – Подгорица [111, 117, 114, 115, 116].

5.2. Геометриски параметри на колосекот

Геометриските параметри на колосекот се еден од главните индикатори за неговата стабилност и безбедност. За да се анализира нивната деградација низ годините, направени се систематски мерења во повеќе последователни години. Овие мерења овозможуваат анализа на промените во геометриските параметри на колосекот и нивното влијание врз безбедноста и комфорот на железничкиот сообраќај.

Во докторскиот труд, покрај геометриските параметри, земени се предвид и карактеристиките на горниот строј и податоци за експлоатацијата. Мерењата од 2017, 2019 и 2022 година се користат за градење на моделот, додека мерењата од 2024 година служат за негова валидација.

Параметри кои се мерат за дефинирање на состојбата на геометријата на колосекот се следните:

- Ширина на колосек – растојанието помеѓу внатрешните површини на главата на шините, измерено 14 mm пониско од належната површина на главата на шината. Ова е критичен параметар за стабилноста при движење на возилата и отпорноста на бочни сили [72].
- Витоперење на колосекот – разлика во витоперењето на шините на кратки растојанија, што може да предизвика нестабилност на возилата и неправилна дистрибуција на оптоварувањето [72].
- Смер/насока на колосек (Л и Д) – хоризонтално отстапување на главата на шината од референтната линија. Големи отстапувања можат да доведат до неправилно движење на возот и зголемено триење на шината и обрачот од тркалото [72].
- Дефекти во надолжен профил (Л и Д) – вертикално отстапување на шините од нивната средна вертикална положба, што влијае врз удобноста на возењето и дополнителните динамички напрегања во горниот строј на пругата [72].

Вклучувањето на овие податоци во моделите за предвидување овозможува подетално разбирање на трендовите на деградација и подобро планирање на мерките за одржување со цел подобрување на безбедноста и ефикасноста на железничката инфраструктура.

5.3. Индекс на квалитет на колосекот – TQI

Во традиционалните пристапи, состојбата на железничката инфраструктура се оценува преку поединечни мерења на геометриските параметри (ширина на колосекот, вертикални и хоризонтални неправилности, напречна нивелација итн.). Сепак, оваа метода има неколку ограничувања:

- Фрагментиран пристап: секој параметар може да има варијации кои не се доволно значајни самостојно, но во комбинација создаваат сериозни проблеми за стабилноста на возилата во движење.
- Субјективност во толкувањето: бидејќи различни железнички оператори можат да користат различни прагови на вредности за дефекти, компаративната анализа е тешка.

- Неоптимална идентификација на критични точки: ако се разгледуваат дефектите поединечно, одржувањето може да се насочи кон мали поправки наместо кон структурни интервенции во најпогодените делници на пругата.

Индексот на квалитет на колосекот (Track Quality Index – TQI) е агрегатен показател што служи за квантификација на вкупниот квалитет на железничката инфраструктура. Наместо да се анализираат индивидуално сите геометриски параметри на колосекот, TQI овозможува да се сублимираат сите измерени грешки во еден глобален индекс, што ја поедноставува оценката за состојбата на колосекот.

Индексот на квалитет на колосекот (TQI) е главниот индикатор за состојбата на геометријата на колосекот. За попрецизно предвидување, TQI е пресметан како агрегатен индекс кој ги сумира сите геометриски параметри на колосекот, вклучувајќи и фактор на стабилност, ширина, смер/насока и витоперење како резултат на надвишувањето на едната шина на делници во кривини. Пресметката на TQI е направена со методот на Комбинирана стандардна девијација (CoSD), кој овозможува квантитативно изразување на варијациите на геометријата на пругата [118]. Пресметките се направени со примена на следната формула:

$$TQI = \sum_{j=1}^M w_j \cdot \sigma_j$$

каде што:

- σ_j – стандардна девијација на секој параметар
- w_j – тежински коефициенти кои одредуваат колку секој параметар влијае на финалниот TQI. Овие тежински коефициенти се усвоени согласно препораките во стандардот EN 13848 и UIC Leflet n.518 (Табела 23.).

Пресметката на индексот на квалитет на колосекот (TQI) врз основа на методот на Комбинирана стандардна девијација (CoSD) вклучува примена на тежински фактори w_j , кои се користат за нормализирање и релативно вреднување на влијанието на секој геометриски параметар во агрегираниот индекс. Бидејќи параметрите за оцена на геометриски квалитет на колосекот (на пр. вертикална стабилност, витоперење, ширина) се изразени во различни мерни единици и имаат различно влијание врз безбедноста и квалитетот на возењето, тежинските фактори имаат клучна улога во правилното интегрирање и земање во предвид на нивните ефекти.

Тежинските фактори се дефинираат согласно европските стандарди EN 13848 [109] и техничките упатства на UIC 518 [110], но можат да бидат адаптирани и според практични податоци од национални железнички оператори (на пр. Deutsche Bahn, SNCF, Network Rail). Во ова истражување се применети тежински фактори усогласени со препораки од академска литература и инженерска пракса, прикажани во следната табела:

Табела 23. Вредности за тежински коефициенти

Параметар	Тежински Фактор
Ширина на колосек	1.2 – 1.5
Стабилност на шина	1.0 – 1.3
Смер/насока	0.8 – 1.2
Витоперење	1.5 – 2.0

Овие вредности се одредени врз основа на инженерски критериуми, како што следува:

- Витоперење (1.8): Овој параметар претставува релативна промена во попречен смер на колосекот кој геометриски се подесува на кратки растојанија со т.н. наклон на преодна рампа и има директно влијание врз стабилноста на движењето на возилата. Всушност на должината на оваа преодна рампа се врши надвишување на надворешната шина во однос на внатрешната што влијае на бочното забрзување при поминување на возилата во кривина. Како резултат на тоа надвишување на надворешната шина во однос на внатрешната, двете шини во делот на преодната рампа се на различна висина и гледано во попречен правец на колосекот се добива наклон на должината од преодната рампа. Ова геометриско уредување на колосекот на должината на преодната рампа се нарекува витоперење. На должината од преодната рампа четирите тркала од една самостојна вртлива платформа (bogie) се на различна висина кое што може да доведе до нестабилност во движењето на тркалата, ако геометриски не се уреди правилно колосекот. Поголемото витоперење од дозволеното може да доведе до излегување на тркалото од шина или преоптоварување на системот на амортизација, особено кај возови што се движат со голема брзина. Поради критичното влијание врз безбедноста, витоперењето добива највисок тежински коефициент [79].
- Вертикална Стабилност (1.5): Вертикалното отстапување на шините од проектираната геометрија влијае врз удобноста на возење и појавата на дополнителни вертикални динамички сили што се пренесуваат од возилото на колосекот. Значајни вертикални геометриски дефекти можат да предизвикаат дополнителни удари, вибрации и долгорочно оштетување на инфраструктурата, што го оправдува високиот коефициент за овој параметар [79].
- Ширина на колосек (1.2): Отстапувања од проектираната геометрија на ширината на колосекот секогаш не предизвикува моментална нестабилност во движењето на возилата, но отстапувањата во ширината можат да доведат до лош контакт помеѓу тркалото и шината, зголемено абеење на шините и долгорочно зголемена деградација на колосекот. Тежинскиот фактор од 1.2 ја одразува оваа средна важност [79].
- Смер/насока (1.1): Хоризонталното отклонување од проектираната геометрија влијае главно врз удобноста и траекторијата на движење на возот, но неговото влијание врз безбедноста најчесто е релативно помало. Затоа овие параметри добиваат најнизок тежински коефициент [79].

Со примена на овие тежински фактори, методот на CoSD овозможува изедначено и реално вреднување на различните видови геометриски отстапувања. Овој пристап овозможува:

- објективна проценка на состојбата на колосекот,
- идентификација на делници со критични геометриски дефекти,
- споредба помеѓу делници со различни геометриски карактеристики.

Тежинските фактори не само што служат за математичка нормализација на индексот за квалитет на колосекот, туку претставуваат и инженерски механизам за интерпретација на геометриските дефекти во оперативни и безбедносни ризици по сообраќајот.

Овој метод е избран бидејќи овозможува сеопфатна проценка на состојбата на железничкиот колосек, земајќи ги предвид сите можни геометриски дефекти без да се игнорира ниту еден параметар. Дополнително, методот овозможува споредливост помеѓу различните параметри, кои природно се изразени во различни единици (милиметри, степени, проценти). Со примена на тежински фактори, овие параметри се „нормализираат“, што овозможува нивно релевантно вреднување во однос на влијанието врз квалитетот на колосекот. Најзначајната предност на оваа методологија е тоа што методот е усогласен со европските железнички стандарди EN 13848 [109] и UIC 518 [110], кои ја дефинираат методологијата за мерење и анализа на геометриските дефекти и нивното прифатливо ниво во однос на безбедноста и комфорот при возењето. Оваа стандардизација е особено важна бидејќи овозможува компаративна анализа меѓу различни железнички оператори и географски региони, како и унифициран пристап во одлуките за одржување.

Повисоките вредности на TQI покажуваат поголеми геометриски отстапувања, што значи полош квалитет на колосекот, додека пониски вредности означуваат стабилна и добро одржувана железничка траса (Табела 24).

Табела 24. Толкување на вредностите за глобалниот индекс на квалитет (TQI)

TQI вредност	Толкување
0 – 10	Одличен квалитет на колосекот – многу мали деградации, нема потреба од интервенција.
10 – 20	Добар квалитет на колосекот – мали деградации, но може да биде потребна превентивна инспекција.
20 – 30	Среден квалитет на колосекот – препорачливо е редовно одржување за да се спречи влошување.
30 – 40	Лош квалитет на колосекот – потребно е одржување во блиска иднина за да се избегнат дефекти.
>40	Критичен квалитет на колосекот – неопходни се итни поправки за да се одржи безбедноста.

Овој пристап е корисен за истражувања поврзани со долгорочно моделирање на деградацијата на железничките пруги, бидејќи овозможува статистичка анализа на историските вредности на TQI и развој на оптимизирани стратегии за одржување. Со вклучување на напредни аналитички методи, како што се машинското учење и предиктивната анализа, може да се изработат модели кои ќе ја предвидуваат деградацијата на пругата и ќе овозможат ефикасно планирање на интервенциите.

Дополнително, примената на TQI во анализата на железничката инфраструктура овозможува идентификација на трендовите на деградација, што ја подобрува ефикасноста на инвестициите во железничката мрежа. На пример, следењето на TQI низ подолг временски период овозможува идентификација на делниците што најбрзо ја губат својата геометриска стабилност, што е критично за планирање на интервентни мерки и алокација на буџетски средства. Како резултат, методот CoSD обезбедува стандарден, објективен и транспарентен механизам за проценка на железничката геометрија, кој може да се примени за компаративни анализи меѓу различни делници или инфраструктурни конфигурации, со што директно придонесува кон унапредување на безбедноста и ефикасноста на железничкиот систем.

Методот Комбинирана стандардна девијација (CoSD) е значаен алат за современите железнички оператори и инженерски тимови, бидејќи овозможува квалитетна, стандардизирана и предвидлива анализа на состојбата на пругата. Неговата применливост

во анализа на големи бази на податоци и неговата компатибилност со најновите технолошки трендови во инженерството и анализа на податоци го прават еден од најперспективните методи за следење и управување со железничката инфраструктура во иднина.

5.4. Инфраструктурни параметри

Во истражувањето на состојбата на железничката пруга, инфраструктурните параметри претставуваат клучен фактор кој може значително да влијае на стабилноста и деградацијата на колосекот. Под терминот инфраструктурни параметри се подразбираат карактеристики на трасата поврзани со специфични градежни и локациски услови кои создаваат поинаков механички и динамички контекст во кој функционира пругата – како на пример присуство на мостови, тунели, кривини и наклони. Овие услови имаат потенцијал да влијаат врз начинот и интензитетот на механичко и геометриско оптоварување на колосекот, да генерираат асиметрични напрегања и да влијаат на фреквенцијата и типот на потребни интервенции.

Посебно во теренски сложени делници на пруга како Колашин – Подгорица, каде што трасата минува низ планински масиви, стрмни наклони и геомеханички нестабилни зони, овие параметри добиваат уште поголема тежина. Во вакви услови често доаѓа до нестабилност на планумот и ослабување на елементите на горниот строј на колосекот (застор, прагови, шини), што може да доведе до долгорочни деформации, губење на геометријата и зголемена фреквенција на потребни интервенции. Нивната анализа овозможува идентификација на критичните делови на инфраструктурата и процена на нивното влијание врз индексот на квалитет на колосекот (TQI), кој е клучен за инженерско донесување одлуки за одржување. Инфраструктурните параметри во ова истражување се интегрирани во статистичките и машински модели како индикаторски променливи (дискретни 0/1 вредности, односно со т.н. dummy бинарни варијабли или индикаторски променливи), што овозможува изолирана проценка на нивното влијание во присуство на други континуирани параметри. Тие се обработени врз база на просторна локација и инженерски критериуми, како што следува:

- Присуство на мост

Оваа променлива претставува бинарен индикатор кој опишува дали одреден колосечен сегмент се наоѓа на мостовска конструкција. Вредноста 1 означува присуство на мост, додека 0 означува дека делницата е на земјена подлога (насип или ископ).

Присуството на мост е значаен фактор за анализата на геометриската стабилност на колосекот, бидејќи мостовите претставуваат конструкции со различни гранични услови и динамичко однесување во однос на околните делници. Колосекот поставен на мост е изложен на повисоки динамички сили, кои вклучуваат вибрации, ударни оптоварувања и диференцијални поместувања меѓу конструктивните елементи. Овие појави се резултат на комплексната интеракција меѓу возот, колосекот и мостовската конструкција, која при повисоки брзини може да создаде динамички оптоварувања поголеми од оние на делници во насип [119, 120].

Како последица, во зоните на мостовите често се појавува локализирано слегнување на колосекот, зголемени напрегања во праговите и засторот, како и забрзана деградација на геометријата. Поради тоа, променливата „присуство на мост“ е вклучена во моделите за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) со цел да се овозможи пообјективна проценка на ефектите од различните типови на подлога врз долгорочната стабилност на трасата.

- Присуство на тунел

Оваа променлива е дефинирана како бинарен индикатор кој означува дали одредена делница на колосекот се наоѓа во тунел (1 – присуство на тунел, 0 – отворен колосек). Присуството на тунел претставува фактор со значително влијание врз стапката на деградација на геометријата на колосекот, поради специфичните услови што преовладуваат во затворениот тунелски простор.

Во тунелите, одводнувањето е ограничено, а природната вентилација на засторот е намалена, што резултира со задржување на влага и вода во конструктивните слоеви на колосекот. Таквите услови доведуваат до намалена стабилност на засторот и подлогата, бидејќи влагата предизвикува распаѓање на камениот материјал, појава на замрзнување и одмрзнување во зимски услови, како и хемиска деградација на материјалите. Дополнително, ограничената циркулација на воздухот во тунелот го отежнува сушењето на насобраната влага, што го засилува ефектот на акумулирана влажност и долготрајна деградација на материјалите [121].

Овие појави резултираат со побрза деградација на геометријата на колосекот во однос на отворените делници, како и со повисоки барања за одржување делниците во тунели. Поради тоа, променливата „присуство на тунел“ е вклучена во моделите за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) со цел да се квантифицира специфичното влијание на ограниченото одводнување, влагата и слабата вентилација врз долгорочната стабилност на колосекот.

- Присуство на железничка станица

Оваа променлива претставува бинарен индикатор кој означува дали одредена делница се наоѓа во рамки на железничка станица или во нејзина непосредна близина (1 – присуство на станица, 0 – надвор од станица). Близината на станица има значајно влијание врз однесувањето на колосекот и неговата долгорочна геометриска стабилност, поради карактеристичните динамички услови што се јавуваат на овие делници.

Во зоните на железничките станици, колосекот е изложен на чести сили на забрзување и забавување, кои се резултат на тргнување и запирање на возовите. Овие динамички оптоварувања создаваат дополнителни вибрации и нарушувања на засторот, што со тек на време доведува до појава на геометриски неправилности и побрза деградација на колосечната конструкција. Поради тоа, делниците во и околу станиците обично бараат почести интервенции на подбивање во споредба со делниците од отворениот колосек.

Вклучувањето на променливата „близина на станица“ во моделите за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) овозможува да се опфати влијанието на засилените динамички оптоварувања и зголемената активност на возови во овие зони. Со тоа се обезбедува порелевантна проценка на стапката на деградација и се поддржува пооптимално планирање на одржувањето, особено во делниците идентификувани како подрачја со зголемен ризик од деградација [122].

- Хоризонтална геометрија

Радиусот на хоризонталните кривини претставува еден од клучните геометриски параметри за оценка на однесувањето и стабилноста на колосекот. Оваа променлива е изразена во метри и опишува степен на закривеност на трасата, при што помал радиус означува поостра кривина. Радиусот на кривините е директно поврзан со динамичките сили кои дејствуваат во зоната на контактот меѓу тркалото и шината, и затоа има суштинско

значење за проценката на страничните сили, абеењето на шини и брзината на геометриска деградација.

Со намалување на радиусот, центрифугалните сили што настануваат при движењето на возот низ кривината се зголемуваат, што резултира со поголеми странични оптоварувања и повисоки контактни сили во на контактната површина меѓу тркалото и шината. Ова доведува до забрзано абеење на шините, појава на брановидно абеење на површината на шината (rail corrugation) и постепено влошување на геометријата на колосекот.

Истражувањата потврдуваат дека хоризонталниот радиус не е само геометриски параметар, туку претставува динамички релевантна променлива што ја одредува распределбата на оптоварувањата и нивното влијание врз долгорочната стабилност на колосекот [123, 124]. Затоа, точната квантификација на радиусот на кривините овозможува поверодостојно моделирање на процесите на влошување, подобро планирање на активностите за одржување и поголема доверливост на инфраструктурата на долг рок.

- Вертикална геометрија – надолжен наклон

Надолжниот наклон претставува геометриски параметар што ја опишува вертикалната геометрија на железничкиот колосек, и најчесто се изразува во промили (‰). Овој параметар има значајно влијание врз механичкото однесување на колосекот и неговата долгорочна стабилност, особено на делници со изразени наклони.

На пострмни делници од трасата, возовите мора да совладуваат поголеми сили на влечење при искачување и сили на сопирање при спуштање, што резултира со зголемени надолжни оптоварувања во колосекот. Овие дополнителни сили создаваат зголемени напрегања во засторот и подлогата, што со тек на време може да доведе до диференцијално слегнување и нерамномерни деформации. Експериментални истражувања потврдуваат дека надолжните сили предизвикани од наклонот претставуваат еден од главните фактори кои придонесуваат за ваквото нерамномерно слегнување, бидејќи големите сили на влечење и сопирање ја зголемуваат динамичката интеракција помеѓу возот и колосекот [125].

Затоа, надолжниот наклон не треба да се смета само за геометриски описен параметар, туку за влијателен фактор што ја определува механичката реакција на колосекот. Точната проценка на надолжниот наклон е особено важна при моделирање на деградацијата и развој на предиктивни модели за одржување, бидејќи овозможува навремено идентификување на делници под ризик од слегнување и формирање стратегии за намалување на негативните ефекти од стрмните делници на трасата [126].

- Старост на елементите на горниот строј

Оваа променлива го претставува временскиот период (во години) што поминал од вградувањето или последната целосна замена на основните носечки компоненти на горниот строј на колосекот: шини, прагови, колосечен прибор и засторна призма. Овие елементи се континуирано изложени на механички оптоварувања од сообраќајот и климатски влијанија, што со текот на времето доведува до замор на материјалот, абеење и намалување на конструктивната стабилност.

Старите прагови и деградираните шини имаат намалена еластичност и носивост, што предизвикува зголемено витоперење (искосување на колосекот во попречен правец во кривини), нестабилност и локални деформации, особено на делници со интензивен сообраќај. Намалувањето на носивоста на засторот дополнително води кон прогресивна загуба на геометриската стабилност, особено во зони со слаба носивост на планумот.

Според повеќе истражувања, делници со старост на горниот строј над 25–30 години без интервенции или реконструкција покажуваат значително повисоки вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI) и побрзо темпо на деградација [10].

Во рамки на ова истражување, староста е вклучена како континуирана променлива, определена врз основа на инфраструктурната евиденција за последната реконструкција или поставување на горниот строј. При тоа, како параметар е вклучена само староста на праговите, бидејќи шините и засторната призма се поставени во иста година по должина на целата делница и не покажуваат просторна варијабилност. Наспроти тоа, праговите биле заменуваани селективно на различни подделници во различни временски интервали, што овозможува нивната старост да биде реално варијабилан параметар со влијание врз стапката на геометриско деградирање на колосекот.

5.5. Експлоатациони параметри

Експлоатационите параметри претставуваат суштински оперативни фактори кои директно влијаат на состојбата и динамичката стабилност на железничкиот колосек. Тие го одразуваат сообраќајното оптоварување што се пренесува на колосекот во услови на секојдневен сообраќај и се клучни за разбирање на деградационите процеси што се активираат со текот на времето. Анализата на експлоатационите параметри овозможува поврзување на оперативниот режим на сообраќај со промените во индексот на квалитет на колосекот (TQI) и игра централна улога во развојот на модели за предвидување и оптимизација на стратегиите за одржување.

Во овој труд и истражување, се анализираат следниве експлоатациони параметри:

- Брзина на возење (V)

Брзината на возење, изразена во километри на час (km/h), претставува еден од клучните параметри што влијаат врз динамичките услови на експлоатација на железничкиот колосек. Максимално дозволената брзина на одредена делница дефинирана е

врз основа на состојбата на инфраструктурата и регулаторните ограничувања, со цел да се обезбеди стабилност и безбедност на движењето.

Со зголемување на брзината, возот создава повисоки динамички сили и поголеми вибрации, што резултира со засилено механичко напрегање, побрз замор на материјалите и интензивира оштетување на шините и засторот. Овие ефекти се особено изразени на делници со мали радиуси на кривини, промени во надолжниот профил или нехомогени геотехнички услови, каде стабилноста на колосекот зависи од хоризонталната и вертикалната геометрија на трасата и способноста на подлогата да ги апсорбира и рамномерно распореди динамичките оптоварувања.

Истражувањата потврдуваат дека честите забрзувања и забавувања предизвикуваат нагли промени во нормалните и страничните сили, што ја нарушува рамномерноста на контактот тркало – шина и го зголемува ризикот од нарушување на геометријата на колосекот. Дополнително, екстремни намалувања на брзината можат да предизвикаат динамичка нестабилност на возилата, појава на вибрации и нерамномерно пренесување на оптоварувањата врз колосечната конструкција [127, 1].

Поради тоа, променливата „брзина на возење“ е вклучена во моделите за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) како динамички параметар што овозможува проценка на влијанието на експлоатационите услови врз стапката на деградација и дефинирање на граници на безбедна експлоатација.

- Интензитет на сообраќајот

Интензитетот на сообраќај претставува годишно акумулирано оптоварување на колосекот, изразено во бруто тони на годишно ниво. Овој параметар е еден од најважните индикатори за мерење на вкупното механичко и динамичко влијание на кое е изложен железничкиот колосек во текот на експлоатацијата.

Зголемениот интензитет на сообраќај значи и почеста и поинтензивна појава на динамички сили, кои дејствуваат врз сите елементи на конструкцијата, шини, прагови, застор и подлога. Таквите повторливи оптоварувања водат до акумулирано абеење, замор на материјалите и забрзана деградација на геометријата на колосекот. Најизразени ефекти се јавуваат кај делници со товарен и мешан сообраќај, каде циклусите на тешки оптоварувања предизвикуваат деформации на засторот, слегнување на подлогата и појава на нерамнини во колосекот кои бараат почести интервенции на регулирање и одржување [128, 29].

Истражувањата покажуваат дека вкупното годишно бруто оптоварување претставува клучен фактор во оценката на геометрискиот квалитет на колосекот, при што делниците со повисок сообраќаен интензитет имаат побрза деградација на геометриските параметри и поголеми вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI) во споредба со делници со помало оптоварување [129].

Поради тоа, променливата „интензитет на сообраќај“ е вклучена во моделите за предвидување на TQI како оперативен параметар кој овозможува пообјективна проценка на влијанието на сообраќајното оптоварување врз стапката на деградација и помага во прецизно предвидување на потребите за одржување и оптимално управување со инфраструктурата.

Овие параметри се имплементирани како континуирани влезни променливи во аналитичките и машински модели за проценка на стабилноста на колосекот. Нивното вклучување овозможува поцелосно разбирање на реалните услови на експлоатација и поддржува инженерски валидирана проценка на потребата за интервенции. Соодветната анализа на експлоатационите параметри е клучна за донесување проактивни одлуки за одржување и рационализација на ресурсите во управувањето со железничката инфраструктура.

5.6. Податоци за извршено машинско одржување на колосекот

Одржувањето на железничката инфраструктура е еден од најкритичните фактори за зачувување на стабилноста, функционалноста и безбедноста на железничкиот колосек [11]. Со цел да се анализира неговото влијание врз стабилноста на инфраструктурата и индексот на квалитет на колосекот (TQI), вклучени се податоци за извршени машински интервенции во различни временски периоди.

Редовното машинско регулирање на колосекот и обликувањето на засторот претставуваат две клучни активности за одржување на геометријата на железничката пруга. Овие активности не само што ја подобруваат стабилноста на колосекот, туку и го продолжуваат неговиот век на траење преку намалување на геометриските отстапувања и дополнителните динамичките оптоварувања што произлегуваат од експлоатацијата [12]. Анализата на податоците за машинското одржување овозможува идентификација на неговото влијание врз стабилноста на железничкиот систем и квантификација на неговата ефективност во спречување на деградацијата на колосекот.

За целите на ова истражување, земени се во предвид следните параметри, при анализата на машинското одржување:

- Машинско регулирање на колосекот

Оваа променлива означува дали на делницата е извршено машинско регулирање на геометријата на колосекот во соодветната година (1 – регулирање е извршено, 0 – не е извршено). Машинското регулирање претставува една од најзначајните активности во рамки на тековното одржување на железничкиот колосек со засторна призма. Постапката се изведува со специјализирана машина за регулирање, која преку подигнување на колосекот и подбивање на засторот под праговите овозможува враќање на проектираната положба на колосекот во ситуација и профил.

Главната цел на оваа интервенција е корекција на геометриските девијации, намалување на динамичките влијанија и стабилизирање на колосечната конструкција. На тој начин се обезбедува попрецизна геометрија, намалени вибрации и подобрен комфор при возење, при што експлоатационите услови повторно се доведуваат во рамките на дозволените толеранции дефинирани со стандардите EN 13848 [109] и UIC 518 [110].

Сепак, и покрај непосредниот позитивен ефект врз геометријата, машинското регулирање има и структурни последици врз засторот, бидејќи вибрациите и механичките дејства на подбивачките запци предизвикуваат распаѓање и фрагментација на камениот материјал, што може да доведе до намалување на компактоста и долгорочна нестабилност на засторот. Овие ефекти со тек на време можат да резултираат со забрзана деградација на геометријата, особено при чести интервенции [130, 131].

Поради тоа, машинското регулирање претставува инженерски компромис меѓу моментално подобрување и потенцијална долгорочна деградација, а оптимизацијата на бројот и временскиот распоред на интервенциите е суштински аспект на управувањето со одржувањето. Во ова истражување, оваа променлива е вклучена со цел да се квантифицира влијанието на фреквенцијата на регулирањата врз индексот на квалитет на колосекот (TQI) и да се анализираат краткорочните и долгорочните ефекти од овие интервенции врз динамичката стабилност на трасата [132, 133].

- Машинско планирање и обликување на засторната призма

Машинското планирање и обликување на засторната призма означува дали на делницата е извршена машинска интервенција на засторот во соодветната година (1 – извршено профилирање, 0 – не е извршено). Активноста подразбира профилирање и обликување на засторната призма со цел враќање на нејзиниот правилен попречен пресек, обезбедување рамномерна распределба на засторниот материјал и воспоставување на потребната странична стабилност на праговите.

Со тек на време, под влијание на сообраќајното оптоварување и атмосферските услови, засторот се деформира и ја губи својата геометриска форма. Ова доведува до намалена странична стабилност, нерамномерна потпора под праговите и нарушена способност за одводнување, што резултира со витоперење на колосекот, вертикални нерамнини и забрзано абење на конструктивните елементи.

Машинското планирање и обликување на засторот претставува завршна активност по изведено регулирање на колосекот, при што специјализирани машини (динамички стабилизатори) се користат за враќање на правилниот облик на засторната призма и подобрување на одводнувањето. На тој начин се воспоставува оптимална функција на

засторниот слој, што е клучно за долгорочно одржување на стабилноста и квалитетот на колосекот [134].

Во рамки на истражувањето, променливата е вклучена со цел да се квантифицира влијанието на интервенциите врз долгорочната стабилност на колосекот, како и да се оцени нивниот придонес во намалување на брзината на геометриска деградација во споредба со делници без спроведено обликување.

- Број на интервенции

Оваа променлива го претставува вкупниот број на извршени интервенции на одржување во рамки на секој временски интервал помеѓу мерењата (2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024), разгледани по делници и по вид активност, регулирање на колосекот и планирање на засторот. На овој начин се овозможува квантификација на интензитетот на одржувањето и неговата поврзаност со динамиката на геометриската деградација.

Поголем број на извршени интервенции во определен временски период најчесто се поврзува со делници со зголемена нестабилност или побрза стапка на деградација, што бара почести активности за стабилизација и одржување. Наспроти тоа, ретки интервенции во подрачја со изразени геометриски неправилности се знак за недоволен интензитет на одржување и неефикасност на применетата стратегија.

Вклучувањето на бројот на интервенции во моделите за анализа и предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) овозможува квантитативна проценка на влијанието на зачестеноста на активностите за одржување врз забележаните трендови на деградација. Овој параметар дава јасна слика за распределбата на оптовареноста на инфраструктурата и ефектот од различни стратегии за одржување, со што се овозможува оптимизирање на бројот и распоредот на интервенциите за долгорочна стабилност на колосекот [135].

Во рамките на моделите за анализа и предвидување, податоците за машинското одржување се имплементирани како индикаторски варијабли (дискретни 0/1) и нумерички параметри. Нивната интеграција овозможува:

- систематска проценка на ефективностa на извршените активности за одржување;
- разбирање на релацијата помеѓу интервенциите и стабилноста на колосекот во различни експлоатациони и инфраструктурни услови;
- поддршка при донесување одлуки за оптимизација на буџетот за одржување, преку лоцирање на делници со несразмерен однос помеѓу вложувањата и добиените ефекти.

Овој пристап обезбедува методолошка основа за подобро инженерско управување со железничката инфраструктура и унапредување на долгорочната стабилност на системот.

Во понатамошната анализа, истражувањето ќе се насочи кон утврдување на највлијателните параметри кои придонесуваат за деградацијата на геометријата на колосекот, нивната интеракција, како и развој на модели за предвидување кои ќе го поддржат процесот на оптимизација на одржувањето на инфраструктурата. Овј пристап ќе овозможи премин од реактивен кон предиктивен пристап во управувањето со железничката инфраструктура.

6. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕ

Ова поглавје ја прикажува методолошката рамка според која е спроведено истражувањето за оценка и предвидување на деградацијата на геометријата на колосекот.

Истражувањето се базира на интегриран пристап кој ги опфаќа следниве чекори:

- прибирање и обработка на податоци од повеќегодишни мерења,
- развој на модели за предвидување на идната состојба, и
- анализа на просторната стабилност и класификација на делниците според нивото на ризик во сообраќајот.

Посебно внимание во методолошката поставеност е посветено на инженерските интервенции како што се машинското регулирање на колосекот и обликување на засторот. Иако овие активности водат до подобрување на геометријата на колосекот, тие не ја враќаат состојбата на трасата во „како нова“ (as-good-as-new) состојба. Подбивањето претставува делумна и привремена интервенција која предизвикува два главни ефекти врз геометријата на колосекот:

- ненадејно подобрување веднаш по извршената интервенција и
- промена на стапката на деградација на геометријата на колосекот, во некои случаи со забрзување на влошувањето.

Овие ефекти значително влијаат врз стабилноста и предвидливоста на системот, поради што подбивањето се третира како посебен влијателен фактор во развиените модели.

Дополнително, евидентирани се значителни варијации во ефектот на интервенциите, дури и при делници со слични почетни услови, што ја покажува комплексната и често непредвидлива природа на нивното дејство. Честото подбивање, според литературата, може да доведе до влошување на квалитетот на засторот и зголемување на долгорочната стапка на деградација. Овие резултати дополнително ја оправдуваат потребата од детална анализа на влијанието на интервенциите, како и моделирање на појави како шок-настани и точки на пресврт во деградационите трендови.

Во рамки на методологијата, развиени се повеќе предиктивни модели за проценка на индексот на квалитет на колосекот (TQI) за 2024 година. Применети се следниве техники:

- **Класични статистички модели:**
 - Линеарна регресија
 - Полиноминална регресија
 - Ridge¹ регресија
- **Модели со машинско учење:**
 - Random Forest²
 - Поддржувачка векторска регресија (SVR)
 - Невронски мрежи (MLPRegressor)

¹ Ridge е метода за проценка на коефициентите на моделите со повеќекратна регресија во сценарија каде што независните променливи се високо корелирани. Оваа метода е особено корисна за ублажување на проблемот со мултиколинеарност во линеарната регресија, која најчесто се јавува кај модели со голем број параметри.

² Random Forest во буквален превод е „случајна шума“ (дрво) затоа што и дрвјата во шумата ја користат најдобрата стратегија за разделување и вегетирање во природни услови. Методата вклопува голем број регресори на дрвото на одлучување на различни под-примероци од множеството податоци и користи „просекување“ за да ја подобри предвидливата точност и да го контролира прекумерното вклопување.

Моделите се евалуирани и валидирани според добиените вредности за коефициентот на детерминација (R^2), како и според апсолутната и средната квадратната грешка (MAE и RMSE), со цел да се обезбеди споредливост и прегледност на нивната предиктивна моќ. Врз основа на перформансите, избран е најефикасниот модел за поддршка при донесување одлуки за одржување.

Перформансите на моделите се евалуирани според повеќе метрики за точност и стабилност, а резултатите се визуелизирани преку графички и табеларни прикази.

Овој методолошки пристап овозможува холистичко разгледување на состојбата на трасата, давајќи поддршка за носење одлуки поврзани со одржувањето на колосекот на долгорочен план.

6.1. Истражувачка рамка и цели

Целта на истражувањето е да се изгради систематска и технички валидна методологија што ќе овозможи објективна анализа и предвидување на состојбата на колосекот, базирана на квантитативна анализа на геометриските параметри и нивната временска деградација. Главна цел на ова истражување е да се обезбеди научно заснован и инженерски применлив пристап за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) во однос на податоците од мерења на геометријата на колосекот во 2024 година, користејќи реални теренски податоци од претходни години и напредни техники на статистичко и машинско моделирање.

Во поширока смисла, истражувањето претставува интердисциплинарна инженерска студија која ја обединува експертизата од областа на градежништвото, транспортното инженерство, железничка инфраструктура, обработка на податоци и примена на алгоритми од машинско учење. Специфичните теренски и инфраструктурни карактеристики на делницата Колашин – Подгорица, како дел од стратешката железничка пруга Врбница – Бар во Црна Гора, обезбедува реалени инженерски услови за анализа и моделирање.

Главни цели на методолошката рамка, се следниве:

- Да се изгради структуриран систем за прибирање, обработка и трансформација на податоци за геометријата на колосекот, активностите за одржување, инфраструктурните карактеристики и експлоатационите услови, со доследна стандардизација на сите променливи во согласност со европските железнички стандарди (EN 13848 и UIC 518).
- Да се применат и валидираат различни типови на модели (машински и статистички) за предвидување на вредностите на TQI за последниот период (2024 година), при што моделите се евалуираат според статистички мерки на точност, стабилност и инженерска применливост.
- Да се изврши анализа на влијателноста на влезните параметри во моделите врз TQI, со цел да се идентификуваат најрелевантните фактори за деградација и да се поддржи приоритизацијата на инженерски мерки и ресурси.
- Да се разработат дополнителни аналитички техники, вклучително и анализа на континуирана деградација (Piecewise Linear Regression), анализа на влијанието од фреквенцијата на подбивање и оптимизација на интервенции преку симулациони методи, со цел да се обезбеди аналитичка основа за оптимизирање на одлуките за одржување.
- Да се предложи методолошки модел кој е применлив и прилагодлив за слични железнички делници, преку стандардизирана структура на податоци, модели и

процеси, кој ќе може да се користи како рамка за анализа на стабилноста и предвидување на состојбата на колосекот и во други инфраструктурни контексти.

Методолошкиот пристап во ова истражување, заснован е на инженерски и аналитички принципи, при што секој избран метод е селектиран врз основа на неговата способност да обезбеди статистички валидни, технички интерпретабилни и практично применливи резултати во однос на реалната геометриска стабилност, инфраструктурните услови и експлоатационите карактеристики на трасата. Методолошката рамка е насочена не само кон анализа и моделирање, туку и кон практична инженерска поддршка за подобрување на одржувањето, распределбата на ресурси и долгорочната стабилност на железничката инфраструктура.

6.2. Тип на истражување

Истражувањето припаѓа на категоријата на применети квантитативни истражувања, кои користат постоечки реални мерења за да идентификуваат релевантни меѓузависности меѓу параметрите и да развијат модели за предвидување на однесувањето на системот. Во конкретниот случај, тоа значи анализа на промените на вредностите на индексот на квалитет на колосекот (TQI) низ времето, во зависност од различни инфраструктурни и експлоатациони услови и активности за одржување.

Истражувањето се заснова на анализа на историски податоци, прибраны во периодот 2017–2024 година, при што тие се користат за развој на модели за предвидување на идната состојба на колосекот. Дополнително, во рамките на истражувањето се применува иницијална дескриптивна и структурна анализа, насочена кон идентификација на трендови и шеми на деградација кај различни категории на делници.

Истражувањето е насочено кон аналитичка идентификација и квантитативно моделирање на факторите што влијаат врз деградацијата на колосекот, со крајна цел развој на модели со висока предвидувачка способност. Овие модели се евалуираат според технички мерки и се интерпретираат од инженерски аспект, со цел нивна практична примена.

Истражувањето го следи принципот на објективна научна валидност, каде што акцентот е ставен на мерење, анализа и проверка на хипотези преку квантитативни и статистички техники, со цел да се минимизира субјективното влијание и да се обезбеди репродуктивност на резултатите. Истовремено, пристапот е насочен кон апликативна вредност, односно генерирање резултати што можат да помогнат при инженерското управување со железничката инфраструктура.

Овој тип на истражување се разликува од експериментални истражувања, бидејќи не се врши контролирана промена на условите, туку се анализираат набљудувани вредности во природни и реални инфраструктурни околности. Преку систематска обработка на податоци и примена на математички модели, истражувањето се стреми да даде објективни сознанија за процесот на деградација и ефектите од мерките за одржување.

6.3. Дефиниција и категоризација на променливи

Променливите што се користени како влезни параметри за статистичко и машинско моделирање на индексот на квалитет на колосекот (TQI) се категоризирани во четири главни групи: геометриски параметри, инфраструктурни карактеристики, експлоатациони услови и податоци за одржување. Овој пристап овозможува холистичко разбирање на факторите што влијаат врз деградацијата на колосекот на делницата Колашин – Подгорица.

Сите променливи се селектирани врз основа на нивната достапност, инженерска важност и способност да придонесат кон точноста на моделот, како и врз основа на веќе воспоставените модели и препораки во академската литература и стандардите EN 13848 [109] и UIC 518 [110]. Податоците се обработени и трансформирани согласно методологијата прикажана во Поглавје 5.

Понатаму следи систематизиран преглед на сите променливи користени во моделите.

6.3.1. Геометриски параметри на колосекот

Оваа табела прикажува систематизирана класификација на геометриските параметри кои се предмет на мерење и анализа во рамки на истражувањето. За секој параметар, наведена е инженерска интерпретација на неговото значење и влијание врз стабилноста на колосекот, како и начинот на негово претставување во моделот, односно дали променливата е континуирана (мерена со реална вредност) или дискретна (претставена како бинарен индикатор). Параметрите претставуваат клучни индикатори за стабилноста, комфорот и безбедноста на железничкиот колосек.

Табела 25. Геометриски параметри на колосекот, нивно техничко значење и типолошка категоризација.

Параметар	Опис	Тип
Ширина на колосекот	Внатрешно растојание помеѓу шините, критично за стабилноста на колосекот и сигурно возење на возилото по шините.	Квантитативна Континуирана
Витоперење	Наклон на колосекот на кратки делници – поврзан со комфорот на возењето и ризикот од излегување на возилото од шините при зголемени брзини.	Квантитативна Континуирана
Смер/Насока (Л и Д)	Хоризонтални девијации од референтната линија – влијаат врз стабилноста на возење, предизвикуваат бочни отстапувања што влијаат на стабилноста на контактот тркало–шина.	Квантитативна Континуирана
Стабилност на шина (Л и Д)	Вертикални неправилности – влијаат врз динамичко оптоварување	Квантитативна Континуирана

Извор: Сопствени податоци

Напомена: Овие геометриски параметри (ширина, витоперење, смер и надолжен профил) не се користат поединечно, туку се агрегирани во една синтетичка вредност преку методот CoSD (Combined Standard Deviation), опишан во Поглавје 5.3. На овој начин се добива единствен индикатор за квалитет на колосекот – TQI, кој служи како целна променлива во моделите за предвидување.

6.3.2. Инфраструктурни параметри

Во Табела 26 прикажан е збир на клучни инфраструктурни карактеристики кои се интегрирани како влезни променливи во моделите за анализа и предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI). За секој параметар е даден краток опис, како и неговиот тип според природата на податокот (бинарна или континуирана променлива). Овие фактори се критични бидејќи влијаат врз динамичкото однесување на колосекот и го забрзуваат процесот на негова деградација. Просторната обработка на податоците е извршена на ниво на мали делници од пругата од 20 m, со што се овозможува детална анализа на локалните услови по должина на трасата.

Табела 26. Инфраструктурни параметри на трасата, нивно техничко значење и тип на податок.

Параметар	Опис	Тип
Тунел	Делница во тунел (1/0) – влијае врз одводнување, одржување и достапност.	Бинарна
Мост	Делница на мост (1/0) – променети динамички сили поради крути споеви.	Бинарна
Железничка станица	Делница блиску до/во станица (1/0) – повисоки напрегања поради маневри и свртници.	Бинарна
Радиус на кривина	Мерка за закривеност на трасата (во m) – под 500 m претставува критична вредност.	Континуирана
Надолжен наклон	Изразен во ‰ – влијае врз контактни сили и вертикални/хоризонтални напрегања	Континуирана
Старост на прагови	Поголемата старост генерално укажува на зголемена веројатност за оштетувања и намалена стабилност на колосекот.	Континуирана

6.3.3. Експлоатациони параметри

Збир на клучни експлоатациони параметри кои се користени како влезни променливи во моделите за анализа и предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) се прикажани во Табела 27. Станува збор за континуирани експлоатациони параметри, просечна брзина на сообраќај и сообраќаен интензитет, кои служат како индиректни индикатори за механичкото оптоварување и влијанието врз стабилноста на колосекот. Овие фактори имаат суштинско влијание врз динамичката стабилност на колосекот, особено во услови на зголемено сообраќајно оптоварување и експлоатација.

Табела 27. Експлоатациони параметри на трасата, нивното инженерско значење и тип на податок.

Параметар	Опис	Тип
Брзина на возење	Дозволена брзина на делницата (во km/h) – индиректен индикатор за динамичко оптоварување.	Квантитативна Континуирана
Сообраќаен интензитет	Вкупен обем на сообраќај во бруто-тони (Gross Tons) по делница.	Квантитативна Континуирана

6.3.4. Параметри за машинско одржување

Табела 28. Параметри поврзани со машинско одржување на колосекот, нивно значење и тип на податок.

Параметар	Опис	Тип
Машинско регулирање на колосекот	Дали е извршено машинско регулирање на геометријата на колосекот во дадениот период меѓу мерењата (1/0). Активноста вклучува подигање и подбивање на засторот под праговите.	Квалитативна Бинарна
Машинско профилирање на засторот	Дали е извршено машинско планирање и обликување на засторната призма во дадениот период меѓу мерењата (1/0).	Квалитативна Бинарна
Број на интервенции	Колку пати е извршено регулирање или профилирање на засторот во периодот меѓу две мерни кампањи.	Квантитативна Континуирана

Во табела 28 прикажани се параметри за машинско одржување на колосекот, вклучени како влезни променливи во моделите за анализа на TQI. Параметрите вклучуваат

бинарна информација за тоа дали е извршено регулирање на колосекот или подбивање на засторот меѓу кампањите на мерење на квалитетот на колосекот, како и вкупниот број на интервенции. Податоците овозможуваат проценка на влијанието од одржувањето врз стабилноста и деградацијата на колосекот. За секој параметар наведен е краток опис и тип на параметар (бинарен или континуиран).

6.4. Прибирање на податоци и нивна техничка обработка

Податоците кои се користени во овој труд, претставуваат основа за целокупната анализа, моделирање и евалуација на индексот на квалитет на колосекот (TQI). Тие се обезбедени од Железничка инфраструктура на Црна Гора (ЖИЦГ) и опфаќаат геометриски мерења, информации за инфраструктурни објекти, експлоатациони услови, интервенции за машинско одржување, како и дополнителни податоци за старост на конструктивните елементи и обемот на сообраќај.

Податоците се собрани во рамки на четири одделни циклуси на мерења: 2017, 2019, 2022 и 2024 година. Сите мерења се реализирани со возило за мерење на геометријата на колосекот, опремено со сертифицирани инструменти, во согласност со европскиот стандард EN 13848-2 [136], а резултатите се обработени според националното Упатство бр. 339 [73] на ЖИЦГ. Податоците се обезбедени во дигитален табеларен формат и претставуваат реални теренски евиденции за состојбата на колосекот.

Делницата Колашин – Подгорица поделена е на хомогени делници со должина од 20 метри, согласно методологијата објаснета претходно. Оваа просторна поделба овозможува детална и локализирана анализа на условите на трасата, како во однос на геометријата, така и во однос на инфраструктурните влијанија.

За секоја од овие делници се собрани податоци во четири независни години, 2017, 2019, 2022 и 2024, што овозможува анализа на временските трендови и промени во деградацијата за иста локација. Ваквата просторно – временска структура на податоците овозможува примена на аналитички методи кои го следат развојот на состојбата на колосекот низ време за секоја поединечна делница, при што се задржува точната географска позиција на секое мерење.

Податоците се добиени со високостандардизирана методологија на мерење и верификација, со користење на редовно калибрирано возило за мерење на геометрија. Според документацијата од ЖИЦГ, мерењата се изведени со утврдена и повторлива процедура, што обезбедува висока точност, сигурност и конзистентност на резултатите. Не се евидентирани критични недостатоци или нецелосни податоци, а сите вредности се вкрстено проверени во процесот на подготовка за предвидување (детално објаснето во Поглавје 4).

Овие карактеристики на базата на податоци овозможуваат примена на напредни аналитички пристапи, обезбедуваат статистичка стабилност на резултатите и претставуваат сигурна техничка основа за развој на модели за предвидување.

6.5. Подготовка на податоците

Процесот на развивање на аналитички и пресметковен модел за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) започнува со систематска техничка подготовка на податоците. Овој процес вклучува низа чекори: чистење, трансформација, нормализирање и структурирање на податоците, со цел да се обезбеди нивна аналитичка конзистентност и техничка применливост.

Подготовката на податоците претставува критична фаза во секое квантитативно истражување, таа има директно влијание врз точноста, стабилноста и валидноста на крајните резултати. Во анализите за предвидување, особено кога се применуваат методи од машинското учење, од клучно значење е влезните податоци да бидат уредени во стандарден и усогласен формат и со јасна просторна и временска структура.

Исто така, детално се опишани техничките чекори преземени за подготовка на базата на податоци, вклучувајќи отстранување на нецелосни или погрешни вредности, нормализирање на нумеричките параметри со цел елиминација на разликите во размерот, како и финално обединување на сите променливи во единствен табеларен формат, погоден за пресметковна анализа и примена на аналитички модели.

6.5.1. Чистење и валидација на податоците

Најпрвин се започнува со техничка проверка на податоците, при што се идентификуваат грешки, нелогични записи и вредности надвор од инженерски прифатливи граници. Повторените податоци се отстрануваат, а празните или нереалните вредности се обработуваат преку исклучување или интерполација, во зависност од природата на променливата и контекстот на анализата.

Табела 29. Преглед на категориите и бројот на променливи вклучени во анализата.

Група на параметри	Опис и примери на променливи	Вкупен број
Геометриски параметри	Вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI) за 2017, 2019, 2022 и 2024 година, како и пресметани параметри на деградација помеѓу периодите (на пр. деградација 2017–2019 и 2019–2022).	6
Инфраструктурни параметри	Карактеристики на трасата и објектите: радиус на закривеност, присуство на тунел, мост и железничка станица.	4
Оперативни параметри	Брзина на возење и вкупен сообраќаен товар (изразен во тонски километри).	2
Параметри поврзани со одржување	Старост на праговите и број на извршени активности за регулирање на колосекот и профилирање на засторот по временски периоди (2017–2019, 2019–2022, 2022–2024).	7
Идентификациони и помошни полиња	Позиција на делницата долж трасата (стационажа).	1
Вкупно:		20 параметри за анализа

Во рамките на овој процес беа опфатени 821 податоци со вкупно 20 параметри, кои ги опфаќаат мерењата на геометријата на колосекот за периодот 2017–2024 година, односно четири последователни кампањи на мерење. Во текот на проверката не беа детектирани дупликати или вредности кои недостасуваат, што означува високо ниво на конзистентност и целосност на податоците. Притоа, користени се граници дефинирани во техничките регулативи (вклучувајќи го Правилникот бр. 339 на ЖИЦГ и стандардот EN 13848), а контролата е спроведена врз основа на инженерска логика. Овој чекор овозможи база на податоци со висока точност и конзистентност, погодна за понатамошна пресметковна анализа и развој на аналитички модели.

Променливите во базата на податоци се поделени во четири главни групи според нивната природа и функција во анализата. Ваквата категоризација овозможува систематско следење на влијанието на геометриските, инфраструктурните, оперативните и параметрите

на одржување врз деградацијата на колосекот и врз вредностите на индексот на квалитет на колосекот (TQI).

Ваквата структура овозможува јасна инженерска интерпретација и прецизна подготовка за понатамошно моделирање на деградацијата и предвидување на промените во квалитетот на колосекот во текот на времето.

6.5.2. Интеграција и структурирање на податоците

По завршување на техничката проверка и нормализацијата, податоците се интегрираат во единствена, конзистентна и аналитички употреблива табеларна структура. Во оваа структура се обединети податоци од различни извори, геометриски мерења, инфраструктурни карактеристики, експлоатациони индикатори и евиденција за машинско одржување, со цел секоја делница и секој временски интервал да бидат целосно опфатени со сите релевантни параметри.

Секоја редица во табелата претставува единечна просторна единица (делница од 20 метри) во конкретна година на мерење. За секоја од овие делници се прибрани податоци во четири различни години, 2017, 2019, 2022 и 2024, при што за секоја иста локација се обезбедени мерења направени во повеќе временски интервали, што овозможува следење на промените во тек на време. Ваквата структура на податоците е погодна за примена на аналитички техники кои истовремено ја земаат предвид временската динамика на параметрите и просторната распределба на трасата.

Во финалната табела вклучени се:

- Целна променлива (TQI₂₀₂₄),
- Влезни (влијателни) променливи (геометриски карактеристики, инфраструктурни карактеристики, експлоатациони карактеристики, машинско одржување),
- Идентификациони променливи (делница, година, стационажа).

Организацијата на податоците во оваа форма овозможува примена на различни техники на машинско учење, регресиона анализа и визуелизација на резултатите. Дополнително, ваквата структура овозможува лесно филтрирање, групирање и проверка на податоците при секоја последователна анализа.

6.5.3. Нормализирање на нумеричките параметри

За да се обезбеди усогласеност меѓу различните влезни параметри и да се елиминира нивниот различен размер на вредности, во рамки на подготовката е извршено нормализирање на сите нумерички параметри. Овој чекор е од големо значење бидејќи статистичките и пресметковните модели, како што се методите на машинско учење, се чувствителни на варијации во обемот на податоци, при што променливи со поголеми апсолутни вредности можат непропорционално да влијаат врз резултатот [137, 138].

Во ова истражување применет е методот Min-Max скалирање, со кој секоја променлива се трансформира во опсегот од вредност 0 до вредност 1 [138], според следната формула:

$$X_{\text{нормализирано}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

Предложениот пристап ја задржува структурата на распоредот на вредностите, и ги трансформира, така што сите променливи имаат еднаков придонес во процесот на моделирање. Нормализацијата е извршена само врз влезните нумерички променливи (како што се: дозволена брзина, годишен сообраќај, радиус на кривина, надолжен наклон), додека

целната променлива TQI не е скалирана, со цел зачувување на нејзината инженерска интерпретабилност.

Ваквиот пристап овозможува сигурна примена на аналитички методи и стабилно тренирање на модели, особено кај алгоритми чувствителни на размерот на променливите и на релативните растојанија меѓу податоците, како што се оние базирани на Евклидова мерка³ или градиентна оптимизација⁴ (на пр. невронски мрежи, регресија) [139].

Како резултат на извршените технички постапки, проверка, прочистување, нормализирање и структурирање, податоците се организирани во стандардизиран табеларен формат погоден за квантитативна анализа. Ваквата подготвена база на податоци обезбедува високо ниво на доследност и техничка валидност, што претставува предуслов за сигурна примена на аналитички и пресметковни методи. На оваа основа може да се спроведе анализа на влијанието на поединечни параметри врз состојбата на колосекот и развој на модели за предвидување на состојбата на колосекот.

6.6. Проценка на важност на параметри (Feature Importance)

Во рамки на проценката на факторите што најмногу влијаат врз вредноста на индексот на квалитет на колосекот (TQI), спроведена е анализа на важноста на влезните променливи преку примена на Random Forest регресионен модел, во комбинација со техниката Leave – One – Out Cross Validation (LOOCV). Овој пристап овозможува идентификација и рангирање на параметрите според нивниот релативен придонес во објаснувањето на варијациите на целната променлива, како и поткрепа при изборот на најрелевантните параметри за финалното предвидување.

6.6.1. Примена на Random Forest модел

Random Forest претставува збирна техника за машинско учење, која се користи за задачи на регресија и класификација. Основната идеја е да се комбинираат повеќе независни дрва на одлуки (decision trees) во заедничка структура – „шума“ – за да се добие поефикасен, поробустен и статистички постабилен модел во споредба со индивидуалните “дрва” [140, 141].

Random Forest функционира според следниве принципи:

- Bootstrap агрегирање (bagging): За секое поединечно дрво во шумата се извлекува случајно подмножество на податоци со враќање од целосната база. Тоа значи дека одредени примероци (делници) можат да се појават повеќепати во еден избор, додека други можеби нема да бидат вклучени. Овој принцип овозможува варијација меѓу дрвата, што ја зголемува разновидноста на моделите и го намалува ризикот од приспособување на моделот на податоците за тренирање (overfitting).

³ Евклидова мерка (или Евклидово растојание) е најпознатата и најчесто користената мерка за растојание помеѓу две точки во евклидски простор (просторот што го опишуваме во класичната геометрија). Таа ја пресметува „директната“ (праволиниска) оддалеченост помеѓу две точки, слично како со линија што ги спојува на карта. Ако податоците не се нормализирани (на пример, една променлива е изразена во метри, а друга во километри), Евклидовата мерка може да доведе до искривување на резултатите, бидејќи променливите со поголеми нумерички вредности ќе имаат несразмерно поголемо влијание врз пресметаното растојание.

⁴ Градиентна оптимизација (англ. gradient-based optimization) е општ назив за класа на алгоритми кои го користат градиентот (односно насоката на најбрзо зголемување или намалување на функцијата) за да ја минимизираат или максимизираат некоја целна функција. Ова е централна техника во машинското учење, особено кај модели како невронски мрежи, логистичка регресија, SVR, MLP, итн.

Како резултат, се подобрува генерализациската способност на целиот збиен модел [140].

- Стохастички избор на променливи: При секоја поделба во структурата на поединечно дрво, не се разгледуваат сите влезни параметри, туку се избира мала, случајна група од нив. Од оваа група се одбира оној параметар што доведува до најголемо намалување на грешката. Овој пристап ја намалува зависноста на моделот од параметри кои имаат слично влијание (висока меѓусебна поврзаност), и овозможува поголема разновидност меѓу дрвата, со што се намалува ризикот од преголема адаптација на моделот на податоците за учење, што ја ограничува неговата способност да прави точни предвидувања врз нови, невидени податоци [140].
- Агрегирање на резултатите: Кај задачи од типот на регресија, финалната предвидена вредност се добива како просек од резултатите на сите поединечни дрва во моделот. Овој пристап со комбинирање на повеќе независни предвидувања го намалува ефектот на варијабилноста кај поединечни модели, што резултира со постабилна и поверодостојна конечна проценка [142].

Од посебен интерес во рамките на ова истражување е способноста на Random Forest моделот да обезбеди внатрешна проценка на важноста на влезните променливи (feature importance). За секоја поединечна променлива се пресметува нејзиниот придонес во намалувањето на вкупната грешка на моделот, мерена преку средната квадратна грешка (Mean Squared Error – MSE). Ова се прави преку анализа на сите поделби во шумата на дрва каде што променливата се користела, при што се акумулира вкупното подобрување на точноста за секој случај.

На тој начин, се добива квантифицирано рангирање на сите променливи според нивното реално влијание врз перформансите на моделот, што претставува важна подлога за инженерска интерпретација и избор на клучни параметри во понатамошните фази на анализа и моделирање.

Конфигурација на моделот

Random Forest моделот е конфигуриран со следнава поставеност на параметри, со цел да се постигне рамнотежа помеѓу точноста на предвидувањата, способноста на моделот да избегне пренагласено прилагодување кон податоците за тренирање (overfitting), стабилното однесување на моделот при анализа на податоци со различна обемност, варијабилност и технички карактеристики, како што се различни геометриски профили, инфраструктурни услови или динамика на сообраќајот по должината на трасата:

- Број на дрва ($n_estimators = 100$): Избрана е вредност што обезбедува доволна статистичка стабилност на резултатите, без преголемо зголемување на пресметковната сложеност;
- Максимална длабочина на дрвјата: Оставена да се одреди автоматски од страна на алгоритмот, што овозможува прилагодување кон структурата и комплексноста на податоците;
- Критериум за поделеност: Mean Squared Error (MSE), избран како соодветна мерка за регресиони задачи, поради неговата сензитивност на поголеми отстапувања, со што се нагласува потребата од минимизирање на сериозните грешки и се овозможува поефикасна оптимизација на поделбите во дрвото;

- Случаен избор на променливи при поделба: Активиран (feature bagging), со цел да се зголеми разновидноста меѓу дрвјата и да се намали зависноста од корелирани променливи;
- Фиксирана вредност на random_state: Зададена за да се овозможи репродуктивност на резултатите, односно повторливо добивање на исти резултати при идентични услови.

Оваа конфигурација е избрана како резултат на претходни тестирања и усогласена со добри практики за примена на Random Forest во инженерски апликации со ограничени серии на податоци.

Предности на примената

Примената на Random Forest моделот е резултат на неговите методолошки и технички предности, кои го прават соодветен за ова истражување:

- Висока точност и стабилност на резултатите: Благодарение на збирната структура, моделот комбинира повеќе одделни дрва на одлука, што овозможува минимизирање на варијабилноста и компензација на слабостите на поединечните модели што се тренирани врз различни подмножества од податоците [143];
- Отпорност на аномалии и шум во податоците: Random Forest покажува одржливи перформанси дури и во присуство на изолирани екстремни вредности или нецелосно прочистени податоци, што е од особена важност при работа со реални инфраструктурни мерења [144];
- Интерпретабилност на резултатите: Моделот овозможува директна проценка на важноста на секоја влезна променлива, што придонесува за разбирање на инженерската логика зад донесените предвидувања и идентификација на највлијателните фактори [143];
- Ефикасна обработка на податоци: Погоден е за обработка на поголеми и високо – димензионални бази на податоци, како што е случајот во ова истражување кое опфаќа податоци од повеќегодишни мерења и вклучува голем број параметри од различен карактер, геометриски, инфраструктурни, експлоатациони и параметри поврзани со активности за одржување [144].

Овие карактеристики го прават Random Forest соодветен избор за комбинирана техничка анализа и инженерска интерпретација во рамките на проценката на важноста на параметрите што влијаат врз TQI.

6.6.2. Leave One Out Cross Validation (LOOCV) – Вкрстена валидација

Техниката Leave – One – Out Cross Validation (LOOCV) или вкрстена валидација, претставува посебен случај на k-fold валидација, каде што бројот на подмножества за валидација е еднаков на вкупниот број на примери во базата на податоци [145].

LOOCV функционира на начин што за секоја итерација од моделот се издвојува по едно подмножество од точно еден параметар кој служи како тест – компонента, додека сите преостанати параметри се користат за тренирање. Процесот се повторува N пати, каде N е вкупниот број на делници во анализата. На тој начин, секој примерок од базата на податоци еднаш се појавува како тест – податок, а (N–1) пати како дел од тренинг сетот [145].

Во секоја итерација од Leave–One–Out крос-валидацијата се извршуваат следните чекори:

- Моделот се обучува врз основа на N–1 примероци.

- Потоа, се врши предвидување за преостанатиот (N-ти) примерок и се пресметува грешката на моделот.
- Добиената грешка од секоја итерација се евидентира и користи за пресметка на просечната точност и стабилност на моделот.

По извршување на сите итерации, се пресметува средната вредност на грешките од сите N чекори, која служи како објективен показател за точноста, стабилноста и способноста на моделот.

Техниката LOOCV е применета бидејќи овозможува:

- Максимална искористеност на податоците: Во секоја итерација се користи 99,9% од достапните податоци за тренирање, што е особено важно при релативно ограничени серии на податоци.
- Точна и стабилна евалуација: Поради индивидуалното тестирање на секој примерок, LOOCV овозможува висока чувствителност во откривање на нестабилности во моделот.
- Инфраструктурна релевантност: Секој примерок претставува одделна делница од трасата, што овозможува локализирана валидација и идентификација на делници со најголеми отстапувања.

Во анализата, LOOCV комбиниран е со Random Forest алгоритам за да се изврши проценка на важноста на параметрите, односно да се утврди релативниот придонес на секоја влезна променлива во објаснувањето на варијациите во индексот на квалитет на колосекот (TQI). Оваа комбинација обезбедува високо ниво на доверливост и инженерска интерпретација на добиените резултати.

Главна слабост на LOOCV е зголемената пресметковна сложеност, бидејќи моделот се тренира N пати. Сепак, со оглед на модерните ресурси и релативно умерената големина на базата на податоци (3288 податоци), овој недостаток не претставува пречка за успешна имплементација во рамки на оваа методологија.

6.7. Методологија за предвидување и валидација

Развиен е пристап за обучување, тестирање и евалуација на предиктивни модели за проценка на индексот на квалитет на колосекот (TQI₂₀₂₄). Применети се методи од две главни категории: класични статистички методи и современи алгоритми од областа на машинското учење. Целта е да се изврши споредбена анализа на нивната точност, стабилност и инженерска применливост при моделирање на сложени релации помеѓу различни фактори и геометриската состојба на колосекот. Пристапот вклучува унифицирана методолошка рамка за сите модели, што овозможува директна споредба под идентични влезни услови и мерки на евалуација.

6.7.1. Цел и логика на предвидувањето

Целта на предвидувањето е да се развие пресметковна рамка што ќе овозможи предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI₂₀₂₄), врз основа на претходно измерени вредности (2017, 2019, 2022) и релевантни влезни променливи кои се однесуваат на инфраструктурни карактеристики, геометриски параметри, експлоатациони карактеристики и активности за одржување. Бидејќи целната променлива е континуирана, проблемот е формулиран како задача која се работи со регресиона анализа, а не класификациона.

Во машинското учење, регресионите задачи се однесуваат на модели каде што целната променлива е континуирана и нумеричка, односно може да зема било која вредност во одреден интервал (на пр., $TQI = 2.57$). Целта е да се изгради модел кој предвидува реална нумеричка вредност [146].

Од друга страна, класификационите задачи се однесуваат на предвидување на категоричка целна променлива, при што се предвидува класа или категорија (на пр., добар/лош колосек, класа I/II/III). Во тие случаи, излезот е ограничен на дискретен број на можни класи [146].

Бидејќи вредноста на TQI претставува реална и мерлива бројка, која не е ограничена на фиксни категории, моделот се третира како проблем на регресија, при што се бара најпрецизно можно приближување на континуирана вредност.

Во анализата се вклучени два вида модели, класични статистички пристапи и современи алгоритми за машинско учење, со цел да се опфати поширок спектар на можно однесување на податоците и да се идентификува најсоодветниот модел за инженерска примена.

Класични статистички модели се:

- Линеарна повеќекратна регресија (Linear Regression): основен модел кој ја анализира линеарната зависност помеѓу влезните променливи и целната променлива (TQI).
- Полиномна повеќекратна регресија (Polynomial Regression): проширување на линеарниот модел со додатни степенски (полиномни) членови (на пример, x^2 , x^3), со цел да се опфатат потенцијалните нелинеарни релации.
- Ridge регресија: модел кој користи λ_2 -норма за да ја намали чувствителноста на моделот на корелирани „независни променливи“, со што се намалува ризикот од приспособување на моделот на податоците за тренирање (overfitting) и се подобрува стабилноста.

Модели со машинско учење се:

- Random Forest: збиен модел базиран на повеќе дрва на одлука, кој ја подобрува точноста и стабилноста преку стохастички избор на податоци и променливи; детално објаснет во Поглавје 6.6.
- Support Vector Regression (SVR): метод базиран на хипер – рамнини, кој ја предвидува вредноста така што максимално ги минимизира отстапувањата во рамките на ϵ -зона на толеранција, притоа зачувувајќи висока генерализациска способност.
- Multi-layer Perceptron Regressor (MLP): невронска мрежа со повеќеслојна архитектура, нелинеарни активациски функции (ReLU), и најмалку два скриени слоја со 50 и 20 неврони. Овој модел е применет со цел да се опфатат комплексни и неексплицитно дефинирани релации меѓу влезните параметри и TQI .

Овој избор овозможува анализа на различни видови модели, од едноставни и лесно интерпретабилни, до сложени и високо – нелинеарни, со цел да се идентификува најефикасниот и најстабилниот пристап за предвидување на состојбата на колосекот.

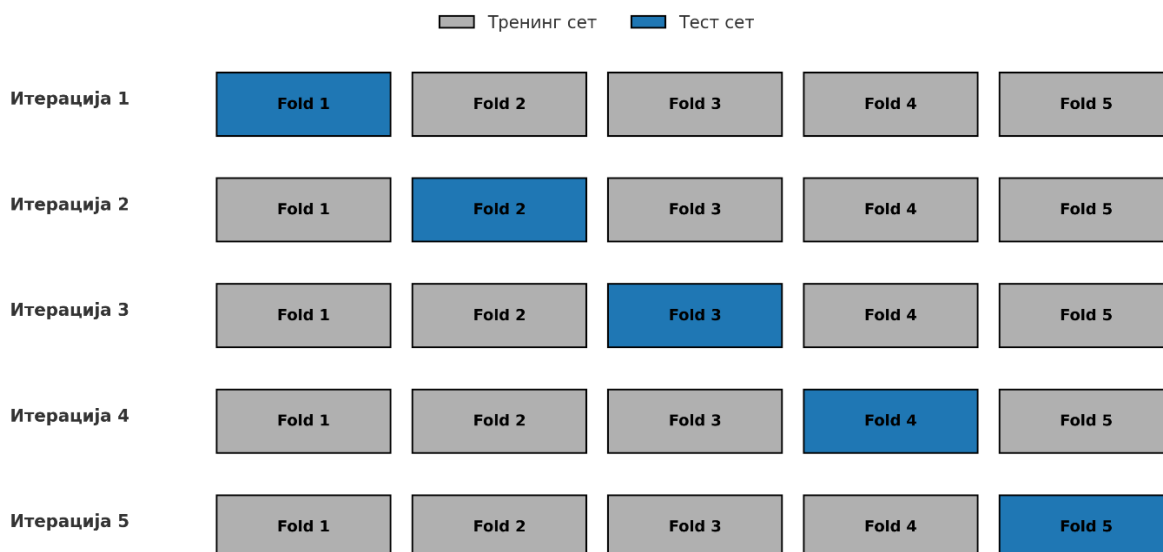
Слика 44 прикажува како влијателните параметри и историските податоци се користат за тренирање на моделот, со цел предвидување на вредноста на TQI_{2024} .



Слика 44. Структура на моделот за предвидување на TQI₂₀₂₄

6.7.2. Методологија за тренирање и тестирање

За да се обезбеди доверлива и објективна проценка на способностите на разгледуваните модели, во ова истражување е применета техниката 5 – fold cross – validation (вкрстена валидација), стандардна методолошка техника во машинското учење и статистичкото моделирање. Овој пристап овозможува квалитативна евалуација на моделите без потреба од одделување на фиксни тест – сетови, што е особено важно при анализа на инфраструктурни податоци со ограничена големина [147].



Слика 45. Визуелна шема на постапката на 5-fold cross-validation.

Во рамки на оваа стратегија, целокупниот сет на податоци се дели на пет приближно еднакви подмножества (fold-ови). Во текот на пет последователни итерации, секој од овие подмножества (fold-ови) се користи еднаш како тест – сет, додека преостанатите четири подмножества (fold-ови) се користат за тренирање на моделот. На тој начин, секое подмножество е еднаш искористено за тестирање и четирипати за тренирање (учење) [147].

Текот на 5-fold cross-validation е прикажан на слика 45.

Во секоја итерација, по тренирањето, моделот се евалуира на тест – сетот, при што се пресметуваат статистички мерки за евалуација (како што се R^2 , RMSE, MAE). На крај, овие вредности се усреднуваат за да се добие кумулативна и стабилна проценка на точноста на моделот [147].

Предности на примената на 5-fold cross-validation се:

- Стабилна и робустна проценка на перформансите: Усреднетиот резултат од пет независни тестирања ги намалува варијациите и овозможува реална и балансирана проценка на генерализацискиот капацитет на моделот [148].
- Изедначено искористување на сите податоци: Секое подмножество се користи и за тренирање и за тестирање, што е особено важно во случаи со ограничена достапност на податоци, како што е често во инфраструктурни и инженерски истражувања [149].
- Контрола на преоптоварување (overfitting): Ротационата поставеност спречува моделот да се „приспособи“ на една конкретна подгрупа од податоци, со што се намалува преголемата зависност од специфични случаи и се засилува способноста за предвидување врз нови, невидени примери [149].
- Фер споредба помеѓу модели: Бидејќи сите модели (линеарна регресија, Random Forest, SVR, итн.) се валидираат под исти услови, се овозможува објективна и правична споредба на нивната точност, стабилност и применливост [150].

Овој пристап е систематски применет врз сите модели во истражувањето и класични статистички и оние базирани на машинско учење. Со тоа, се обезбедува унифицирана и транспарентна проценка на нивната ефикасност во предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) и се поставува основа за избор на моделот со најдобри перформанси за понатамошна примена во инженерска анализа и одлуки за одржување.

6.7.3. Методолошки чекори

Со цел да се обезбеди методолошка доследност и фер споредба меѓу различните модели, применет е унифициран и последователен процес на предвидување. Сите модели, и статистичките и моделите од машинско учење, се развиени, обучени и евалуирани врз основа на идентични влезни податоци, чекори и критериуми за оценување. Овој пристап овозможува објективна проценка на точноста, стабилноста и инженерската применливост на секој модел.

Процесот на моделирање вклучува три главни фази:

1. Подготовка на податоците.
2. Тренирање на моделите.
3. Валидација и евалуација на резултатите.

Овој пристап овозможува доследно и транспарентно моделирање, при што секој чекор е спроведен по однапред дефинирана процедура што обезбедува објективна проценка на точноста и применливоста на различни модели.



Слика 46. Преглед на фази во процесот на моделирање: подготовка на податоци, тренирање на модели и валидација

1. Подготовка на податоците

Првата фаза насочена е кон обезбедување на технички исправна и хомогена база на податоци што ќе се користи како влез за тренирање и тестирање на моделите.

- Вчитување и селекција на податоци

Во моделот се вклучени податоци од четири кампањи на мерења на индексот на квалитет на колосекот (TQI), извршени во периодот 2017, 2019, 2022 и 2024 година. Притоа, за секоја од овие години се достапни и дополнителни параметри што ги вклучуваат геометриските карактеристики, инфраструктурните карактеристики, сообраќајното оптоварување и историјата на одржување на колосекот.

- Градење на влезната структура на моделот

Од податоците за периодот 2017 – 2022 се формираат влезните променливи (features), што ги опфаќаат сите релевантни фактори што потенцијално влијаат врз геометриската состојба на колосекот. Вредноста на TQI за 2024 година (TQI_{2024}) се користи како целна

променлива за предвидување. Ова значи дека моделите се обучуваат на историските податоци и нивната поврзаност со индексот на квалитет на колосекот (TQI), со цел да ја предвидат состојбата на колосекот во иднината.

- **Превенција од информациско истекување (data leakage)**

Клучен принцип во оваа фаза е строго одделување на информации од иднината, со цел да се избегне т.н. data leakage – ситуација во која моделот учи од податоци што не би биле достапни во реална ситуација за предвидување.

Затоа, не се дозволува употреба на било каква променлива што содржи информации од 2024 година во фазата на тренирање. Ова ја гарантира валидноста на резултатите и спречува предвидување врз нереално „претпоставена“ прецизност.

- **Нормализација на вредности преку Min-Max скалирање**

Бидејќи податоците содржат променливи со различен интервал и димензии (на пример: километарски стационажи, брзина, број на интервенции, сообраќајно оптоварување), сите влезни вредности се нормализирани.

Со оваа трансформација, секоја променлива добива вредност во интервалот $[0,1]$, при што:

- се елиминира доминацијата на променливи со повисоки апсолутни вредности (на пример, бруто тонски товар во однос на радиус на кривина);
- се подобрува ефикасноста и стабилноста на процесот на учење кај алгоритмите за машинско учење, особено кај оние чувствителни на различни размери на податоци;
- се овозможува хомогеност во тренирањето и фер проценка на влијанието на секоја променлива.

Овој чекор е од особено значење при примена на модели кои се чувствителни на скалирање (на пр., SVR, невронски мрежи), но се применува униформно врз сите модели заради конзистентност.

2. Тренирање на моделите

Во втората фаза се извршува процесот на градење на моделите за предвидување со користење на податоци за тренирање. Целта на оваа фаза е да се обучат моделите така што ќе ги идентификуваат статистичките релации меѓу влезните параметри и TQI, и потоа ќе бидат способни да предвидат вредности за TQI 2024. Целиот процес е изведен според стандарден и повторлив методолошки протокол, кој гарантира конзистентна примена на условите за тренирање, валидација и тестирање кај сите модели и преку сите итерации.

- **Влезни податоци**

Сите модели се обучуваат користејќи податоци од периодот 2017 – 2022, при што влезните променливи ги опфаќаат:

- геометриски параметри (радиус на кривина, надолжен наклон и др.),
- инфраструктурни карактеристики (тунели, мостови, станици),
- експлоатациони фактори (брзина, сообраќаен товар),
- информации за претходно одржување (машинско регулирање на колосек и подбивање на застор).

Со вклучување на различни групи параметри, моделот може реално да ја преслика комплексната меѓузависност меѓу факторите што го забрзуваат процесот на деградација.

- **Валидациска техника: 5-fold cross-validation**

Во согласност со добрите практики во предиктивното моделирање, за стабилна и објективна евалуација, применета е 5-fold cross-validation, техника на валидирање што се смета за референтна методологија во доменот на машинското учење.

Карактеристики за оваа техника се:

- целокупниот сет на податоци се дели на пет подеднакви подмножества (fold-ови);
- во секоја од петте итерации, едно подмножество се користи како тест-сет, додека преостанатите четири се користат за тренинг;
- секое податочно множество се користи еднаш за тестирање и четири пати за учење, што резултира со балансирана искористеност на податоците.

Овој пристап овозможува:

- стабилна проценка на перформансите;
- контрола на overfitting;
- фер споредба на модели со различна природа.

- **Примена на статистички и машински модели**

Избраните модели припаѓаат на две различни методолошки групи, што овозможува споредба на традиционални статистички техники со современи машински алгоритми при анализа на TQI.

Класични статистички модели:

- Линеарна регресија: моделирање на линеарна зависност меѓу влезни променливи и TQI;
- Полиноминална регресија: проширување на моделот со степенски термини за да се опфатат нелинеарности;
- Ridge регресија: линеарен модел со l2-регуларизација за намалување на преголема чувствителност.

Алгоритми од машинско учење:

- Random Forest: збир на дрва на одлуки базиран на стохастичко бирање податоци и променливи;
- Support Vector Regression (SVR): модел кој ги минимизира отстапувањата во ϵ -зона на толеранција;
- Multi-layer Perceptron Regressor (MLP): невронска мрежа со повеќеслојна архитектура и нелинеарни активациски функции.

Овој избор овозможува споредба меѓу едноставни, лесно разбирливи модели и комплексни алгоритми со повисока аналитичка моќ.

- **Конфигурација на модели и хиперпараметарска поставеност**

Конфигурацијата на секој модел е внимателно дефинирана со цел да се обезбеди оптимална стабилност, прецизност и генерализациски капацитет, особено при анализа на сложени и хетерогени податоци како што се оние во железничката инфраструктура. Хиперпараметрите на моделите се одредени врз основа на повеќе методолошки извори:

- Анализа на релевантна литература – идентификација на препорачани параметри и поставености од слични студии во доменот на инфраструктурна прогноза и регресионо моделирање;

- Почетни тестирања со параметарски сетови – експериментално тестирање на основни конфигурации врз дел од податоците, со цел да се добие интуитивна насока за очекуваните реакции на моделите;
- Валидациско прилагодување преку grid search – кај модели кај кои тоа е изводливо (на пример, Random Forest, SVR), е извршен систематски избор на хиперпараметри преку внатрешна вкрстена валидација.

Овој пристап овозможува избалансирано поставување меѓу предефинирани препораки и емпириска адаптација, со што се постигнува пониска варијабилност и намалена чувствителност на моделите при ротирање на fold-овите во cross-validation.

Дополнително, за модели кои се осетливи на размерот и дистрибуцијата на податоците (како што се Support Vector Regression и Multi-layer Perceptron), е посветено особено внимание на:

- користење на нормализирани влезни податоци (преку Min-Max нормализирање);
- избор на соодветни kernel функции (за SVR);
- дефинирање на структура и активациски функции кај MLP (на пр., ReLU, број на слоеви и неврони).

На овој начин се обезбедува стабилно тренирање, подобра конвергенција на оптимизациските процеси и минимизирање на ризикот од преголема адаптација (overfitting) или недообученост (underfitting).

6.7.4. Мерки за евалуација на моделите

Со цел да се обезбеди квантитативна и објективна проценка на точноста на моделите, применети се четири стандардни евалуациски мерки, кои овозможуваат различни аспекти на интерпретација на предвидувачката способност:

- **R² (коефициент на детерминација):** Претставува сооднос помеѓу варијацијата на податоците што е објаснета преку регресионата функција и вкупната варијација на целната променлива. Тоа е мерка која покажува колкав дел од варијациите на TQI_2024 може да се објасни со влезните параметри во моделот. R² се движи во интервалот [0,1], каде што повисока вредност означува поголема прецизност и подобро прилагодување на моделот на реалните податоци. R² се пресметува со следната формула:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{rez}}{SS_{tot}}$$

каде што:

$SS_{rez} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ е сумата на квадратите на резидуалите (разликите меѓу реалните и предвидените вредности),

$SS_{tot} = \sum (y_i - \bar{y})^2$ е вкупната сума на квадратите, односно варијацијата на реалните вредности околу нивната средна вредност.

Ако $R^2 = 1$, моделот ги објаснува сите варијации во целната променлива, додека вредност блиска до 0 покажува многу слаба предвидувачка способност [151, 152].

- **MAE (Mean Absolute Error - средна апсолутна грешка):** Претставува просечна апсолутна разлика помеѓу реалните вредности и вредностите предвидени од моделот. Оваа мерка го мери просечното отстапување во оригиналните единици (во овој случај, TQI), без разлика на насоката на грешката (позитивна или негативна) [153].

MAE се пресметува со следната формула:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

каде што y_i е реалната вредност, $\hat{y}_i$ е предвидената вредност, а n е бројот на набљудувања (опсервации) .

Вредноста се изразува во истите единици како и целната променлива, што овозможува директна и практична интерпретација. На пример, MAE од 0.8 значи дека моделот во просек греша за 0.8 единици TQI. Оваа мерка ги третира сите отстапувања подеднакво и не е чувствителна на екстремни вредности, што ја прави стабилна и погодна за инженерска анализа.

- **RMSE (Root Mean Squared Error – корен од средна квадратна грешка)** ја мери просечната големина на грешката меѓу предвидените и реалните вредности, при што се дава зголемена тежина на поголемите отстапувања. Оваа мерка е особено чувствителна на аномалии и екстремни грешки. RMSE се пресметува со следната формула:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

За разлика од MAE, RMSE ги квадрира разликите, што значи дека поголемите грешки имаат поголемо влијание врз конечната вредност. Со квадрирање, секоја разлика се трансформира во позитивна вредност и се засилува нејзиниот ефект. Потоа, се извлекува квадратен корен од средната вредност, со што мерката повторно се враќа во истите единици како и TQI, што ја прави полесна за практична интерпретација [154].

Ниска RMSE вредност значи дека моделот има стабилни и предвидливи резултати, со релативно мали грешки. Повисока вредност на RMSE значи дека постојат поголеми отстапувања во одредени делови од предвидувањата. Особено е корисна мерка кога сакаме да ги минимизираме сериозните грешки, на пример кога е критично да се избегнат големи отстапувања кај делници со потенцијални ризици за безбедност или на делници каде што е планирана интервенција [154].

- **MSE (Mean Squared Error – Средна квадратна грешка):** MSE ја мери просечната квадратна разлика помеѓу реалните и предвидените вредности. Таа е основна мерка за многу модели, бидејќи служи како оптимизациска функција при тренирање [155]. MSE се пресметува со следната формула:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

MSE пресметува колку, во просек, предвидувањата на моделот отстапуваат од реалните вредности, при што секоја разлика се квадрира. На тој начин, поголемите грешки имаат значително поголема тежина во крајниот резултат.

Ова ја прави MSE чувствителна на аномалии или „шум“ во податоците, неколку екстремни отстапувања можат значително да ја зголемат вредноста на мерката. Иако MSE не е директно интуитивна за интерпретација (бидејќи е изразена во квадратни единици на TQI), таа е методолошки важна, особено во контекст на оптимизација. Во инженерски сценарија, таа е корисна за идентификација на

моделите кои имаат потенцијално нестабилни предвидувања или кои се премногу чувствителни на делници со нерегуларни услови [155].

Комбинираната примена на овие мерки овозможува повеќедимензионална и избалансирана проценка на перформансите, на пример:

- R^2 го мери степенот на објаснета варијација од страна на моделот и ја рефлектира неговата стабилност и способност за доловување на внатрешната структура на податоците;
- MAE обезбедува директна и инженерски разбирлива проценка на просечното апсолутно отстапување меѓу предвидените и реалните вредности, изразена во истите единици како и целната променлива;
- RMSE ја истакнува чувствителноста на моделот на поголеми отстапувања, што е особено важно при анализа на критични делници или делови од инфраструктурата со повисоки барања за прецизност;
- MSE служи како основа за оптимизација на моделите и обезбедува корисен увид во распределбата и интензитетот на грешките при тренирањето.

Овој интегриран пристап овозможува технички валидна, транспарентна и објективна проценка на точноста, стабилноста и робустноста на применетите модели, во согласност со инженерските барања и аналитичките цели на истражувањето.

6.7.5. Софтверски алатки и програмска инфраструктура

Целиот процес на моделирање, анализа и евалуација во рамки на ова истражување, направен е користејќи софистицирана програмска инфраструктура, базирана на современи и широко прифатени алатки во доменот на машинско учење и статистичко моделирање. Користени се следниве софтверски компоненти се користени:

- Python

Како основна програмска платформа во истражувањето, Python се користи поради својата универзалност, читливост и применливост во научни и инженерски анализи. Тој е јазик што овозможува лесно пишување и читање на код, со што се скратува времето потребно за развој и тестирање на алгоритми [156].

Клучните причини за неговиот избор се:

- Флексибилна примена во инженерски и аналитички задачи: Python овозможува истовремено користење на алатки за статистичка анализа, машинско учење, обработка на податоци и визуелизација, што овозможува интегриран аналитички пристап.
- Широка достапност на специјализирани библиотеки: Преку библиотеки како pandas, numpy, scikit-learn, xgboost, keras и matplotlib, Python обезбедува готови функционалности за работа со голем број на податоци, имплементација на модели и визуелен приказ на резултати.
- Јасна синтакса и структурираност: Едноставната и јасна синтакса на Python овозможува ефикасна имплементација и интерпретација на алгоритмите, што ја зголемува разбирливоста и транспарентноста на методолошките чекори.
- Поддршка за репродуцибилност и документирање: Во средини како Google Colab, секој чекор од анализата може да се изведе, документира и сподели во форма на интерактивна скрипта, што ја зголемува транспарентноста на истражувањето.

Во рамки на анализите, Python се користи како основна алатка за обработка на податоци, имплементација на модели за предвидување на TQI, тестирање на хипотези и изведување на инженерски интерпретации на резултатите.

- **scikit-learn**

Оваа библиотека користена е за имплементација на класични статистички и машински модели, вклучувајќи: линеарна регресија, полиномна регресија, Ridge регресија (статистички пристапи), како и Random Forest и Support Vector Regression (алгоритми за машинско учење). Таа обезбедува унифициран API (Application Programming Interface – интерфејс за програмирање на апликации), што претставува стандардизиран начин за комуникација помеѓу различни софтверски компоненти. Благодарение на стандардизираниот пристап за дефинирање, обучување и тестирање на модели, scikit-learn овозможува технички прецизна и ефикасна реализација на целиот процес на моделирање, како и вградени методи за валидација и избор на хиперпараметри [157, 158].

- **statsmodels**

За потребите на класичните статистички анализи и параметарско моделирање, во истражувањето е користена библиотеката statsmodels. Таа овозможува имплементација на линеарна регресија, Ridge регресија, како и други методи засновани на веројатносни и економетриски принципи.

Особено се истакнува со својата способност за детална дијагностика на моделите, вклучително и:

- анализа на резидуали,
- тестови за нормална дистрибуција на веројатноста и проверка дали варијацијата на грешките е константна низ сите интервали на податоците (односно дали постои нестабилна распрснатост на грешките, позната како хетероскедастичност),
- проценка на интервали на доверба,
- тестирање на статистичка значајност на параметрите добиени од регресионите анализи (p-вредности).

Покрај тоа, statsmodels овозможува детален увид во резултатите и параметрите на моделот, што ја прави особено погодна за интерпретабилни модели и за споредба со инженерски хипотези и очекувања. Ова ја позиционира библиотеката како клучна алатка во делот на аналитичко моделирање, каде што покрај предвидувачката способност, важно е и разбирањето на причинско – последичните релации меѓу променливите [157, 159].

- **Keras / TensorFlow**

За имплементација на моделот Multi-layer Perceptron (MLP) користена е библиотеката Keras, која претставува високо апстрактен интерфејс базиран на TensorFlow – една од водечките платформи за машинско и длабинско учење.

Овие алатки овозможуваат прецизно дефинирање на структурата на невронските мрежи (број на слоеви, број на неврони по слој, тип на активациски функции и други параметри), како и целосна контрола врз процесот на обука: избор на алгоритам за оптимизација (на пр. Adam, RMSProp), поставување на брзина на учење (learning rate), големина на пакетот (batch size) и број на епохи.

Дополнително, TensorFlow поддржува паралелна пресметка и користење на графички процесори (GPU), што овозможува побрза обработка на големи множества на податоци и покомплексни модели.

Изборот на Keras/TensorFlow условен е од потребата за прецизна контрола на архитектурата на моделот, поддршката за сложени алгоритми и стабилната пресметковна изведба при интензивни процеси на тренирање [157, 159].

- **Google Colab**

Google Colaboratory (Colab) избрана е како работна околина за развој, обука и тестирање на моделите, поради нејзината отворена достапност и целосна компатибилност со алатките и библиотеките од Python средината.

Оваа платформа овозможува користење на напредни пресметковни ресурси, вклучително и GPU (Graphics Processing Unit) и TPU (Tensor Processing Unit), што значително го забрзува тренингот на моделите за машинско учење, особено оние со поголема архитектонска комплексност, како што се невронските мрежи.

Дополнително, Colab нуди директна интеграција со Google Drive, што овозможува организирано чување на скрипти, резултати и експериментални конфигурации, како и олеснета колаборација и преносливост на истражувачките датотеки.

Примената на Google Colab елиминира потреба од локални високо – специфицирани хардверски конфигурации, што обезбедува практична, стабилна и достапна околина за изведување на моделирањето.

Целото моделирање е документирано преку структурирани Python скрипти, со цел да се обезбеди транспарентност, проверливост и целосна репродуктивност на методолошките чекори [159].

6.7.6. Причини за избраната поставеност

Поставеноста на моделите, методите за валидација и изборот на софтверски алатки е резултат на стратешки пристап насочен кон обезбедување на максимална сигурност, точност и применливост на резултатите во инженерски контекст.

- Примената на 5-fold cross-validation овозможува балансирана проценка на моделите преку ротационо користење на подмножества од податоци. Овој метод минимизира ризик од пристрасност, овозможува целосна искористеност на достапните податоци и овозможува стабилна и доверлива евалуација на перформансите. Избран е како компромис помеѓу пресметковна ефикасност и статистичка валидност.
- Изборот на повеќе модели – како класични статистички регресиони анализи (линеарна, полиномна, Ridge), така и напредни машински (Random Forest, SVR, MLP), овозможува споредба помеѓу едноставни и комплексни пристапи, што го зајакнува кредибилитетот на анализата и дава увид во тоа кои методи се најсоодветни за конкретната структура на податоци.
- Примената на различни типови на моделирање (регресиони анализи, збирни, невронски) мотивирана е од потребата да се опфатат различни видови релации помеѓу параметрите, линеарни, нелинеарни, комплексно поврзани или латентни, што ја зголемува аналитичката покриеност и веродостојноста на резултатите.
- Изборот на софтверската инфраструктура (Python, scikit-learn, statsmodels, Keras, Google Colab) воден е од критериуми како што се: техничка стабилност, достапност на open-source решенија, поддршка од научната заедница, и можност за лесна репродукција на резултати. Ова го прави целиот аналитички процес транспарентен и соодветен за академска верификација.

Ваквиот холистички пристап ја потврдува валидноста на методологијата и обезбедува систематско покривање на клучните аспекти во анализа на деградација на колосек, од ефикасно моделирање до интерпретативна применливост.

6.8. Модели за предвидување и евалуација

Во рамките на истражувањето, применети се повеќе модели за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}), врз основа на податоците од претходните мерни периоди (2017–2022) и низа релевантни влезни условно кажано „независни“ променливи. Изборот на модели вклучува и класични статистички пристапи и современи алгоритми за машинско учење, со цел да се обезбеди широка компаративна рамка и да се испита применливоста на различни аналитички техники во доменот на инфраструктурна прогноза.

Сите модели се развиени и евалуирани под еднакви услови, согласно методолошките чекори претставени во Поглавје 6.7.3, користејќи идентична структура на влезни податоци, 5-fold cross-validation техника за проценка и унифицирани мерки за евалуација (R^2 , MAE, RMSE, MSE).

За статистичките модели (линеарна, полиномиална и Ridge регресија) дополнително се спроведени дијагностички проверки на претпоставките на класичната регресија. Овие проверки опфаќаат анализа на мултиколинеарност. Целта на овие анализи е да се обезбеди методолошка валидност и стабилност на добиените параметри.

За моделите од машинско учење (Random Forest, SVR и MLPRegressor) ваквите класични статистички проверки не се применливи, бидејќи овие методи не се базираат на аналитички претпоставки за распределба и варијанса на грешките. Наместо тоа, нивната евалуација се заснова на перформансни метрики (R^2 , MAE, RMSE, MSE) и анализа на стабилноста на резултатите преку 5-fold cross-validation.

Понатаму, дадени се детални објаснувања за секој поединечен модел, вклучувајќи ја неговата методолошка основа, начинот на конфигурација, технички предности и причините за негов избор.

6.8.1. Линеарна регресија

Линеарната регресија претставува една од основните и најчесто користени техники за моделирање на односот меѓу една целна променлива (зависно променлива) и низа „независни“ влезни варијабли. Линеарната регресија е применета како основен статистички модел за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}), врз основа на податоците од претходните периоди (2017–2022). Целта е да се провери дали постои линеарна врска меѓу геометриските, инфраструктурните и експлоатационите параметри и геометриската состојба на колосекот.

Линеарната регресија се базира на претпоставката дека постои линеарна зависност меѓу зависната променлива Y и независните променливи $X_1, X_2, \dots, X_m$, при што се моделира со следнава општа форма:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon$$

каде што:

- Y е целната променлива (TQI_{2024}),
- X_i се влезни параметри или независно променливите,
- β_i се коефициенти добиени од регресионата анализа,

- ε е случајната грешка (остаток) на моделот, со очекување $E(\varepsilon) = 0$ и стандардна девијација σ^2 .

Целта на регресионата анализа е да се најдат вредностите на коефициентите β_i што ќе ја минимизираат функцијата на грешки, најчесто преку методот на сума на разликите на најмали квадрати [160, 161]:

$$\min_{\beta} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Линеарната регресија носи повеќе аналитички и технички предности, што ја прават особено погодна за почетна и споредбена анализа во инженерски системи:

- Јасна аналитичка структура: Обезбедува директна математичка релација помеѓу зависната и независните променливи, при што секој регресионски коефициент претставува квантитативна проценка на влијанието на соодветниот параметар [62].
- Ниска пресметковна сложеност: Моделот се изведува со минимални ресурси и овозможува брза примена, што го прави соодветен за првична анализа и обработка на големи бази на податоци.
- Инженерска транспарентност: Моделот обезбедува јасна информација за насоката (позитивна или негативна) и интензитетот на влијание на секој влезен параметар (независно порменлива) врз целната зависно променлива варијабла, што е клучно за техничка анализа, дефинирање на приоритети и донесување одржливи одлуки за одржување и интервенции.
- Можност за параметарска анализа: Поради директната зависност на целната променлива од влезните параметри, се овозможува идентификација на највлијателните фактори и проценка на нивната статистичка значајност во контекст на деградација на колосекот [62].
- Методолошка стабилност: Како проверен и широко прифатен статистички пристап, моделот овозможува оценка на кохерентноста на податоците и служи како иницијален тест за постоење на линеарна поврзаност.
- Референтна вредност за споредба: Поради својата едноставност и јасна формализација, моделот служи како методолошка основа за споредба со резултати од посложени, нелинеарни или машински модели. Во случај тие да не покажат значително подобрување, изборот на линеарна регресија може да биде оправдан и посоодветен од практична гледна точка.

Како основа за статистичко моделирање, линеарната регресија обезбедува вредна почетна рамка за анализа на зависноста помеѓу повеќекратни параметри и состојбата на железничкиот колосек. Иако ја поедноставува релацијата помеѓу влезните фактори и TQI 2024 со претпоставка на линеарност, нејзината примена е важна за воспоставување базна линија, проверка на логичка поврзаност и иницијална проценка на влијанието на поединечни технички и инфраструктурни карактеристики. Како таква, линеарната регресија не само што служи како аналитички репер, туку и овозможува методолошка проверка на потребата за понатамошно усложнување на моделите во контекст на инженерски предвидувања.

6.8.2. Полиномна регресија

Полиномната регресија претставува проширување на анализите со линеарната регресија, при што се овозможува моделирање на нелинеарни релации меѓу зависната и независните променливи преку вклучување на полиноми од втор, трет или повисок ред.. Овој пристап е особено корисен кога зависностите помеѓу зависно променливата и независно променливите не се соодветно претставени со права линија, туку следат закривена патека. Полиномната регресија е користена за да се провери дали нелинеарните трансформации на одредени влезни параметри водат кон подобро предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}), особено при сложени инженерски услови.

Применета е регресија со полином од втор степен (квадратна функција) за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}), со цел да се опфатат и потенцијални нелинеарни релации помеѓу влијателните параметри и геометриската состојба на колосекот. Изборот на полином од втор ред произлегува од инженерската потреба за модели, кои можат да ги отсликаат нелинеарните ефекти без внесување на нестабилност или преголема сложеност моделот.

Во контекст на анализи поврзани со деградацијата на железничката инфраструктура, честопати се среќаваат релации кај кои влијанието на одредена променлива врз зависно променливата не е линеарно. На пример, радиусот на закривеност на трасата влијае врз деградацијата на колосекот на нелинеарен начин, кај кривини со мали радиуси се јавува значително зголемено влошување на геометријата, додека кај оние со поголеми радиуси ефектот прогресивно опаѓа и се стабилизира. Слично, кај бројот на извршени интервенции за одржување, нивното влијание врз состојбата на колосекот не е секогаш пропорционално. При поединечни интервенции на колосекот, ефектот врз подобрување на квалитетот може да биде ограничен, но со зголемен број интервенции низ времето се јавува акумулиран ефект кој може да резултира со заситување или, дури и со деградација поради прекумерна механичка регулација. Овој сложен однос не може соодветно да се опише со линеарен модел, што ја оправдува употребата на модели со поголема флексибилност, како полиномната регресија од втор степен.

Математички, полиномната регресија од втор степен се изразува како [129]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon$$

каде што:

- Y е зависно променливата (TQI_{2024}),
- X_i се независните влезни параметри/променливи (геометрија, инфраструктура, сообраќај, мешинско одржување),
- β_i, β_{ii} се коефициенти од регресионата анализа,
- ε е случајната грешка на моделот со $E(\varepsilon) = 0$.

Полиномната регресија од втор степен претставува технички компромис меѓу едноставноста на линеарниот модел и потребата за опишување на појави со изразена, но контролирана нелинеарност. Нејзината примена во ова истражување се темели на следниве предности:

- Моделирање на нелинеарни зависимости и релации: Овозможува приближување на ситуации каде што ефектот на одредени параметри не е линеарен низ целиот интервал на вредности. На пример, сообраќајното оптоварување може да има

линеарно влијание до одредена граница, по што неговото зголемување води до експоненцијално забрзување на деградацијата [129, 162].

- Задржување на пресметковна стабилност и практична применливост: За разлика од полиноми од повисок ред, второстепената регресија останува стабилна и предвидлива при практична примена. Таа избегнува осцилации и несакани ефекти (како што се нереални екстреми) кои се јавуваат кај повисоки степени [129].
- Зголемена прецизност без преголема сложеност: Со вклучување на квадратни членови, моделот подобро ги објаснува закономерностите што не се видливи во линеарна рамка, без да ја наруши стабилноста на тренирање. Ова е особено релевантно при ограничени податоци и употреба на техники за валидација како 5-fold cross-validation [129].
- Инженерска интерпретабилност: И покрај вклучената нелинеарност, моделот останува лесен за интерпретација, секој член (линеарен и квадратен) има конкретна инженерска смисла, што овозможува аналитичка проценка на чувствителноста на TQI во однос на различните фактори.

Полиномната регресија од втор степен избрана е како логично проширување на линеарниот модел, со цел да се проверат потенцијални нелинеарни ефекти во структурата на податоците. Таа обезбедува технички оправдано подобрување во случаи каде линеарната рамка е премногу рестриктивна, при што задржува високо ниво на инженерска интерпретабилност. Како таква, второстепената полиномна регресија ја зголемува аналитичката прецизност без да ја наруши применливоста или транспарентноста на резултатите.

6.8.3. Ridge регресија

Ridge регресијата (позната и како Tikhonov regularization) претставува модифицирана форма на линеарната регресија која вклучува регуларизациски член во функцијата на загуба, со цел да се намали преголемата осетливост на моделот кон мултиколинеарност на независно променливите и нестабилност на регресионите коефициенти. Овој пристап е особено корисен кога влезните варијабли се корелирани или кога има голем број влезни (влијателни) променливи во однос на бројот на примероци, што е честа појава кај инженерски податоци поврзани со инфраструктура [163].

Во стандардната линеарна регресија, целта е да се минимизира сумата на квадратите на грешките (OLS – Ordinary Least Squares). Кај Ridge регресијата, дополнително се минимизира и вкупната големина на регресиските коефициенти, преку додавање на ℓ^2 -норма (т.е. сума на квадратите на сите регресиски коефициенти), со цел да се контролира нивната големина и да се зголеми стабилноста на моделот:

$$\min_{\beta} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda \sum_{j=1}^m \beta_j^2$$

каде што:

- y_i е реалната вредност на TQI (зависно променливата),
- $\hat{y}_i$ е предвидената вредност со моделот,
- β_j се регресиските коефициенти,
- λ е параметар кој го одредува степенот до кој ќе се ограничуваат големите вредности на коефициентите, со цел да се спречи преголемо “прилагодување” (overfitting) и да се зголеми општата стабилност на моделот.

Клучна компонента во Ridge регресијата е регуларизацискиот параметар λ (lambda), кој го одредува интензитетот на ℓ^2 -регуларизацијата, односно додавање на сума од квадрати на регресионите коефициенти во функцијата на загуба. Воведувањето на оваа компонента има неколку суштински цели:

- Спречување на преголема варијабилност на моделот (overfitting): со намалување на амплитудата на регресионите коефициенти, моделот станува поотпорен на варијации во тренинг податоците [163];
- Стабилизација при мултиколинеарност: во ситуации каде влезните променливи се силно корелирани, Ridge регресијата овозможува постабилни и поверодостојни проценки на регресионите коефициенти [163];
- Регулација на комплексноста: со контрола на големината на β -коефициентите, се намалува веројатноста од доминација на поединечни променливи и се овозможува подолгорочна прецизност при предвидување [163].

Во практична имплементација, вредноста на параметарот λ (обележан како alpha во библиотеката scikit-learn) се избира преку GridSearchCV техника со внатрешна cross-validation процедура, при што се тестираат различни вредности за да се идентификува оптималната што ја минимизира грешката при валидација [163].

Ridge регресијата претставува проширување на класичниот линеарен модел, особено корисно во ситуации кога влезните променливи покажуваат висока меѓусебна корелација. Нејзините главни предности се:

- Стабилни параметарски проценки: Во случаи кога постои мултиколинеарност (силна корелација помеѓу независните променливи), Ridge регресијата спречува појава на прекумерна варијабилност на регресионите коефициенти, што е честа појава кај обичната линеарна регресија [163].
- Регулација на моделска комплексност: Воведувајќи ℓ^2 -регуларизација, се ограничуваат екстремно големите вредности на параметрите (коефициентите), со што се намалува ризикот од “приспособување на моделот” (overfitting) и се подобрува генерализациската способност на моделот [163].
- Зголемена робустност: Ridge овозможува стабилни решенија и кога бројот на влезни променливи е голем во однос на бројот на набљудувања, што го прави применлив за инженерски апликации со комплексна структура на податоци.
- Автоматизирана оптимизација: Параметарот на регуларизација (λ), кој контролира како ќе се регулираат коефициентите, се одредува со GridSearchCV техника во склоп на внатрешна cross-validation процедура, што овозможува избор на оптимална вредност според метрика на грешка [163].

Ridge регресијата се покажува како соодветна метода за анализирање на сложени инженерски множества на податоци, особено во услови кога постои мултиколинеарност или ризик од преголемо приспособување на моделот. Во контекст на ова истражување, Ridge регресијата претставува технички балансиран компромис помеѓу точноста на класичната линеарна регресија и потребата за подобрена робустност и генерализациска способност. Нејзината примена обезбедува дополнителен слој на доверливост при проценката на влијанието на инфраструктурни и експлоатациони фактори врз финалната состојба на колосекот.

6.8.4. Random Forest

Random Forest претставува збирна техника за машинско учење, која се користи за задачи на регресија и класификација. Основната идеја е да се комбинираат повеќе независни „дрва на одлуки“ (decision trees) во заедничка структура – „шума“ – за да се добие поефикасен, поробустен и статистички постабилен модел во споредба со индивидуалните одлуки [140, 141].

Методолошки принципи

Random Forest функционира според следниве принципи:

- Bootstrap5 агрегирање на податоците (bagging): За секое поединечно „дрво“ во „шумата“ се извлекува случајно подмножество на податоци со враќање од целосната база. Тоа значи дека одредени примероци (делници од пругата) можат да се појават повеќепати во еден избор, додека други можеби нема да бидат вклучени. Овој принцип овозможува варијација меѓу „дрвата“, што ја зголемува разновидноста на моделите и го намалува ризикот од преголемо прилагодување на моделот на податоците за тренирање (overfitting). Како резултат, се подобрува генерализациската способност на целиот збиен модел [164].
- Стохастички избор на променливи: При секоја поделба во структурата на поединечно „дрво“, не се разгледуваат сите влезни независно променливи варијабли, туку се избира мала, случајна група од нив. Од оваа група се одбира онаа варијабла што доведува до најголемо намалување на грешката. Овој пристап ја намалува зависноста на моделот од варијабли кои имаат слично влијание (висока меѓусебна корелација), и овозможува поголема разновидност меѓу „дрвата“, со што се подобрува способноста на моделот да предвидува нови податоци без преголемо прилагодување на специфики од тренинг сетот [165].
- Агрегирање на резултатите: Кај задачи од типот регресија, финалната предвидена вредност за зависно променливата се добива како просек од излезите на сите поединечни „дрва“ во моделот. Овој пристап со комбинирање на повеќе независни предвидувања го намалува ефектот на варијабилноста кај поединечни модели, што резултира со постабилна и поверодостојна конечна проценка [164].

Конфигурација на моделот

Во рамките на истражувањето, Random Forest моделот е конфигуриран со следнава поставеност на параметри, со цел да се постигне рамнотежа помеѓу точноста на предвидувањата, способноста на моделот да избегне преголемо прилагодување кон податоците за тренирање (overfitting), како и неговата стабилност и издржливост при различни структури и карактеристики на влезните податоци:

- Број на „дрва“ ($n_estimators = 100$): Избрана е вредност што обезбедува доволна статистичка стабилност на резултатите, без преголемо зголемување на пресметковната сложеност;
- Максимална длабочина/висина на „дрвјата“: Оставена е да се одреди автоматски од страна на алгоритмот, што овозможува прилагодување кон структурата и комплексноста на податоците;

⁵ Bootstrap е техника за вчитување на податоци во компјутер со помош на неколку почетни инструкции кои овозможуваат внесување на остатокот од податоците.

- Случаен избор на променливи при поделба: Активиран „атрибути на корпата” (feature bagging), со цел да се зголеми разноликоста меѓу „дрвјата” и да се намали зависноста од корелирани променливи;
- Фиксирана вредност на случајна состојба (random_state): Зададена за да се овозможи репродуктивност на резултатите, односно повторливо добивање на исти резултати при идентични услови.

Оваа конфигурација е избрана како резултат на претходни тестирања и е прилагодена за инженерски анализи со ограничен обем на податоци, како што е случајот во ова истражување.

Предности на моделот

Примената на Random Forest моделот се базира на неговите методолошки и технички предности кои го прават особено соодветен за задачи на предвидување:

- Висока точност и стабилност на резултатите: Благодарение на збирната структура, моделот комбинира повеќе одделни „дрва на одлука”, што овозможува минимизирање на варијабилноста и компензација на поединечни слабости во подмоделите на податоци [166];
- Отпорност на аномалии и „шум” во податоците: Random Forest покажува одржливи перформанси дури и во присуство на изолирани екстремни вредности или нецелосно прочистени податоци, што е од особена важност при работа со реални инфраструктурни мерења [165];
- Ефикасна обработка на податоци: Погоден е за обработка на поголеми и комплексни бази на податоци, како што е случајот во ова истражување кое опфаќа податоци од повеќегодишни мерења и вклучува голем број параметри од различен карактер – геометриски, инфраструктурни, експлоатациони и параметри поврзани со активности за одржување [165].

Овие карактеристики го прават Random Forest соодветен избор за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) врз основа на сложени и разновидни влезни податоци.

6.8.5. Support Vector Regression (SVR)

Поддршка на векторска регресија - Support Vector Regression (SVR) претставува еден од основните модели на машинско учење заснован на теоријата на вектори за поддршка (Support Vector Machines – SVM), со адаптација за регресиони задачи. SVR има за цел да најде функција која ги приближува податоците во рамките на дозволено отстапување (маргина), при што се минимизира комплексноста на моделот, односно се избегнува прекумерна чувствителност на „шум” или екстремни во податоците [167, 168].

Методолошки принципи

SVR настојува да изгради регресиона функција така што предвидените вредности се наоѓаат внатре во дефиниран епсилон-интервал (ϵ) околу реалните излезни вредности. Клучните компоненти се:

- Епсилон-интервал (ϵ -insensitive zone): Интервал околу реалните вредности на целната променлива во кој се дозволуваат отстапувања без да се смета дека моделот направил грешка. Сите предвидувања внатре во овој интервал се третираат како задоволителни [168];
- Регуларизациски параметар (C): Овој параметар го контролира балансот помеѓу сложеноста на моделот и дозволеното отстапување од реалните вредности. Висока

вредност на C резултира со модел кој се стреми да ги сведе грешките при предвидувањето на минимум, но може да стане чувствителен на поединечни варијации во податоците (overfitting). Напротив, ниска вредност на C овозможува поширока толеранција на отстапувања, што ја зголемува стабилноста и способноста на моделот да дава прецизни предвидувања и за нови, невидени податоци [168];

- Јадро функција (kernel): Функција која овозможува мапирање на податоците во повисока димензионалност за да се овозможи линеарна поделба во тој простор. Најчесто се користи Radial Basis Function (RBF) заради нејзината флексибилност и способност да моделира нелинеарни односи [168].

Конфигурација на моделот

SVR моделот е применет со следниве конфигурациски параметри:

- Kernel = 'rbf': Радијална базна функција е избрана поради способноста да моделира комплексни, нелинеарни односи меѓу влезните параметри и излезната променлива (TQI);
- $C = 100$: Поставен како повисока вредност со цел да се минимизираат отстапувањата надвор од ϵ -интервалот и да се зголеми точноста на предвидувањето;
- $\epsilon = 0.1$: Вредност на дозволено отстапување околу реалните вредности, што овозможува поголема толеранција на минимални разлики меѓу предвидените и реалните вредности;
- Γ (gamma) = 'scale': Автоматска скала базирана на бројот на влезни параметри, што обезбедува стабилност во мапирањето на влезните вредности во повисок простор.

Конфигурацијата е избрана врз основа на внатрешна cross-validation процедура со GridSearchCV, при што е тестирана низа комбинации на параметри со цел да се избере најоптималната поставеност според RMSE и R^2 мерките.

Предности на моделот

Примената на SVR моделот се базира на неговите методолошки и технички предности кои го прават особено соодветен за задачи на предвидување:

- Флексибилност при нелинеарни врски: Благодарение на kernel-функцијата, SVR може да моделира и сложени, нелинеарни врски меѓу влезните параметри и целната променлива;
- Контролирана комплексност: Преку параметарот C и дефинираниот ϵ -интервал, моделот овозможува прецизна регулација на сложеноста на моделот и изедначеност меѓу приближување и генерализација;
- Добра генерализација: SVR покажува стабилни перформанси и при ограничен број набљудувања, што е важно за инженерски задачи со мали или нерамномерни множества на податоци [169].

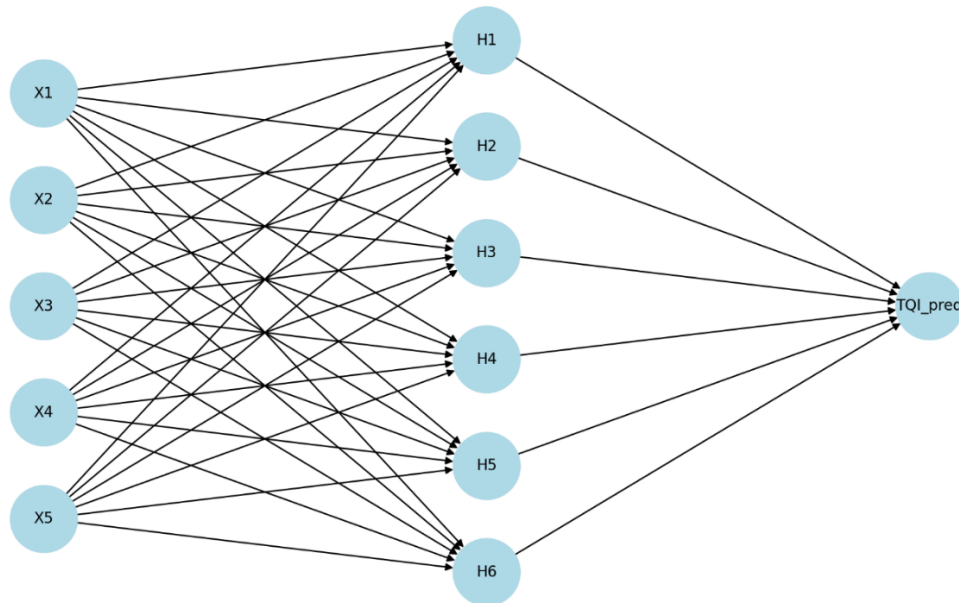
Со оглед на потребата од модели кои можат да опфатат сложени и потенцијално нелинеарни односи меѓу инфраструктурните и експлоатационите параметри и индексот на квалитет на колосекот, SVR се покажа како соодветна и прецизна алатка за предвидување.

6.8.6. Neural Networks MLP Regressor – MLP – Регресор на Невронски Мрежи

Мултислојниот перцептрон (Multi-Layer Perceptron – MLP) претставува класа на вештачки неврронски мрежи од тип повратна информација (feedforward), кој се користи за регресиони и класификациски задачи во рамки на машинско учење. MLP Regressor

применет е како алатка за моделирање на сложени, нелинеарни релации помеѓу параметрите што влијаат врз индексот на квалитет на колосек (TQI) и неговите идни вредности. Овој модел спаѓа во категоријата на универзални апроксиматори, способен да учи од податоци без претходно зададена функционална форма, што го прави применлив во инженерски системи со висока варијабилност и структурна сложеност [170, 171].

Архитектура на MLP моделот за предвидување на TQI



Слика 47. Шематски приказ на архитектурата на применетиот MLP модел за предвидување на TQI.

Методолошки принципи

MLP се состои од минимум три слоја:

- Влезен слој (Input layer): служи како почетна точка за обработка на податоци, каде што секоја влезна променлива се поврзува со соодветен неврон, со што се овозможува понатамошна обработка и трансформација низ скриените слоеви;
- Скриени слоеви (Hidden layers): претставуваат централниот дел од мрежата, каде што влезните податоци се трансформираат преку пондерирана линеарна комбинација и последователна нелинеарна активација, што овозможува моделирање на сложени релации;
- Излезен слој (Output layer): го генерира предвидувањето на целната променлива – во овој случај, TQI_{2024} [170].

Конфигурација на моделот

MLPRegressor конфигуриран е со следнава структура и параметри:

- `hidden_layer_sizes = (64, 32)`: Мрежата содржи два скриени слоја со 64 и 32 неврони, со цел да се балансира капацитетот за учење и стабилноста на предвидувањата;
- `activation = 'relu'`: избрана е ReLU – едноставна и ефикасна функција на активирање која ги задржува само позитивните излезни вредности (а негативните ги заменува со нула), со што се овозможува стабилна пресметка на параметрите и побрзо тренирање на мрежата;

- `solver = 'adam'`: користен е Adam – адаптивен алгоритам за оптимизација кој автоматски ја прилагодува брзината на учење за секој параметар поединечно, што овозможува стабилно и ефикасно тренирање кај податоци со различен природен размер и динамика;
- `max_iter = 1000`: поставен е максимален број од 1000 итерации за да се обезбеди целосна и стабилна обука на мрежата, особено при обработка на комплексни параметри кои бараат повеќе чекори за постигнување оптимално решение;
- `random_state = 42`: поставена е фиксна вредност за почетната случајност во моделот, со што се овозможува секое негово извршување да даде исти резултати и да се обезбеди целосна повторливост на анализата.

Конфигурацијата е определена со примена на GridSearchCV⁶ и 5-fold cross-validation, со цел да се изберат параметри што ја минимизираат грешка при предвидување (RMSE) и обезбедуваат стабилни и доверливи вредности на коефициентот на детерминација R^2 .

Предности на моделот

Примената на MLPRegressor во ова истражување е мотивирана од следниве карактеристики:

- Моќност за моделирање на комплексни релации: Благодарение на нелинеарните активациски функции и скриените слоеви, MLP може да ги опфати и сложените, нелинеарни зависимости меѓу влезните параметри и целната променлива;
- Автоматско учење на обрасци: За разлика од класичните регресиони техники, MLP не бара експлицитно дефинирање на функционална форма, туку самостојно учи од податоците;
- Автоматско учење на обрасци: За разлика од класичните регресиони техники, кои претпоставуваат одреден тип на математичка зависност (на пр. линеарна или полиномна), MLP моделот самостојно го учи односот меѓу влезните параметри и целната променлива, без потреба од однапред дефинирана формула.

Како резултат на горенаведеното, MLPRegressor се покажува како соодветна алатка за предвидување на TQI врз основа на комплексен и мултидимензионален сет на влезни податоци, овозможувајќи стабилни и конзистентни резултати дури и при присуство на нелинеарност и варијабилност во нивната структура и распоред [171].

6.9. Анализа на стапка на деградација

Стапката на деградација на колосекот претставува клучен параметар во проценката на состојбата и планирањето на одржувањето на железничката инфраструктура. Пресметката на деградацијата се темели на анализата на индексот на квалитет на колосекот (Track Quality Index), TQI вредностите измерени во различни временски периоди. Во овој труд, пресметката и анализата на деградацијата се вршат во три последователни периоди: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024.

Стапката на деградација се пресметува со следната формула:

⁶ GridSearchCV претставува алгоритам за избор на оптимална комбинација на хиперпараметри во даден модел. Хиперпараметри се контролни вредности што се задаваат пред тренирањето на моделот (на пр. број на слоеви или тип на активациска функција), и не се учат од податоците. Процедурата функционира така што систематски се тестираат сите можни комбинации од однапред зададена мрежа на вредности (grid), при што секоја конфигурација се оценува преку вкрстена валидација (cross-validation). На крај се избира таа што дава најдобри резултати според избрана статистичка мерка (на пример RMSE или R^2).

$$D_{\{t_1, t_2\}} = TQI_{\{t_2\}} - TQI_{\{t_1\}}$$

каде

$D_{\{t_1, t_2\}}$ – стапка на деградација помеѓу две временски точки t_1 и t_2 .

$TQI_{\{t_1\}}$ и $TQI_{\{t_2\}}$ – измерени TQI вредности во временските точки t_1 и t_2 .

Откако ќе се пресмета стапката на деградација за секој период, резултатите се анализираат за утврдување на трендовите:

- Позитивна вредност на TQI значи дека дошло до влошување на состојбата на колосекот (раст на TQI).
- Поголема позитивна вредност значи побрза деградација, што претставува зголемен ризик од безбедносни проблеми.
- Негативна или многу мала вредност значи стабилност или подобрување на геометријата на колосекот, најчесто поради изведените интервенции за подбивање [172].

За да се добие јасен преглед на трендовите и промените, резултатите се визуелизирани преку линиски графици кои ги прикажуваат TQI вредностите и стапките на деградација во набљудуваните периоди. Ова овозможува идентификација на периоди и делници со значително влошување (континуирани деградации) и дава насоки за понатамошно истражување на причините и факторите кои придонесуваат кон брзината на деградација.

Ваквата анализа служи како основа за понатамошни истражувања во трудот, вклучително анализа на влијанието на интервенциите на подбивање и други фактори поврзани со инфраструктурата и експлоатационите параметри.

6.10. Анализа на умерена и континуирана деградација на геометријата на колосекот

6.10.1. Со примена на Piecewise Linear Regression – Парцијална Линеарна Регресија

Континуираната деградација на геометријата на колосекот претставува постепено, но систематско влошување на состојбата на пругата низ времето. Идентификацијата на вакви трендови е од суштинско значење за навремено откривање на делници со засилен процес на влошување, како и за оценка на ефектот од извршените интервенции за одржување.

За таа цел, се применува методот на парцијална линеарна регресија (Piecewise Linear Regression), кој овозможува разделување на временската серија на две подрачја со различен тренд – пред и по критичната точка (breakpoint), каде се јавува промена во динамиката на деградацијата. Овој пристап овозможува откривање на преодни периоди кон континуирана деградација, со мерење на промената на наклонот на регресионата линија во двете временски зони [173].

Математичкиот модел се дефинира на следниот начин:

$$y = \begin{cases} a_1x + b_1, & x < \text{breakpoint} \\ a_2x + b_2, & x \geq \text{breakpoint} \end{cases}$$

каде:

- y претставува вредност на TQI (зависно променливата),
- x претставува време (години),

- a_1 и b_1 се наклон и пресек на линеарната функција пред критичната точка (breakpoint),
- a_2 и b_2 се наклон и пресек на линеарната функција по критичната точка (breakpoint).

Детекцијата на критичната точка (breakpoint) се изведува преку максимизирање на вкупниот коефициент на детерминација (R^2) за двата сегменти и се врши со следните чекори [173]:

1. За секоја делница се собираат вредностите на TQI за достапните години (2017, 2019, 2022, 2024).
2. Се дефинира можниот временски опсег за критичната точка - breakpoint (пomeѓу првата и последната измерена година).
3. За секоја потенцијална критичната точка - breakpoint година се пресметуваат две линеарни регресии:
 - Регресија пред потенцијалната критичната точка - breakpoint година.
 - Регресија по потенцијалната критичната точка - breakpoint година.
4. Се одредува оптималната критичната точка - breakpoint година каде коефициентот на детерминација на комбинираниот парцијален (piecewise) модел е најголем.

Откако ќе се утврди критичната точка (breakpoint), се пресметува големината на „шокот“ како разлика помеѓу наклоните на двете линеарни функции [173]:

$$\Delta\text{slope} = a_2 - a_1$$

Позитивна вредност на Δslope значи зголемување на стапката на деградација, што претставува негативен индикатор за состојбата на пругата. Наспроти тоа, негативна вредност означува намалување на стапката на деградација, што упатува на стабилизација или подобрување на геометријата на колосекот.

Резултатите од анализата вклучуваат:

- Breakpoint (критична точка): годината во која се јавува значајна промена во трендот на деградација;
- Наклон пред и по breakpoint: параметри што го определуваат интензитетот на деградацијата во двата периоди;
- Магнитуда на промената (Δslope): разлика помеѓу наклоните, која претставува мерка за степенот на влошување или подобрување.

Идентификуваните периоди на континуирана деградација овозможуваат прецизно дефинирање на критични делници долж железничката мрежа кои бараат дополнителна анализа, поинтензивно одржување или можни мерки за реконструкција. Овие информации се основа за подобро разбирање на факторите што го забрзуваат деградирањето на колосекот и за носење на информирани инженерски одлуки при управување со инфраструктурата.

6.10.2. Локализација на деградациите по стационажа

Со цел да се идентификуваат критични точки по должината на трасата, извршена е просторна анализа на континуираните деградации на колосекот. Методологијата се заснова на следниве чекори:

- Применета е парцијална линеарна регресија (Piecewise Linear Regression) за секоја стационажа, со цел детекција на критични точки на промена во трендот на TQI;
- Извршена е визуелизација на деградацијата по периоди: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024;

- Идентификувани се делници со континуирана деградација во сите три набљудувани периоди;
- Определени се ризични стационажи каде TQI покажува пораст ($\Delta TQI > 0$) во сите три последователни циклуси на мерење.

Врз основа на овие критериуми, делниците се категоризирани според фреквенцијата и интензитетот на деградација [174].

Критичните делници се дополнително маркирани со точна стационажа и визуелно поврзани со линија, со што се потврдува нивната сериозност и се потенцира потребата од итна инженерска интервенција.

Во практична смисла, овие делници треба да бидат приоритет за:

- спроведување на структурна санација или целосна реконструкција,
- воспоставување засилен мониторинг и зголемена фреквенција на технички инспекции,
- ревизија и адаптација на постојните стратегии за машинско одржување во насока на долгорочна стабилизација [174].

Овој пристап овозможува подлабоко разбирање на долгорочната динамика на деградација, рационално распределување на ресурсите и донесување на технички основани одлуки со фокус на одржување, стабилност и безбедност на железничката инфраструктура.

6.11. Анализа на влијанието на фреквенцијата на подбивање врз деградацијата на колосекот

Фреквенцијата на изведените активности за подбивање на колосекот претставува значаен фактор што влијае врз ефективноста на одржувањето и динамиката на деградација на колосекот. Целта на оваа анализа е да се утврди дали и во која мера бројот на интервенции за подбивање влијае врз стапката на влошување на геометријата на колосекот [79, 175].

6.11.1. Подготовка и категоризација на податоци

Податоците за бројот на извршени интервенции за подбивање се собрани за трите набљудувани периоди: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024. За секој период, стапката на деградација е пресметана како разлика меѓу TQI вредностите на почетокот и крајот на периодот.

Делниците се категоризираат во групи според бројот на интервенции во секој од периодите:

- 0 интервенции – без одржување,
- 1 интервенција – ниска фреквенција на одржување,
- 2 интервенции – средна фреквенција на одржување,
- 3 или повеќе интервенции – висока фреквенција на одржување.

6.11.2. Статистичка корелација – Pearson-ов коефициент на корелација

Се применува Pearson-ов коефициент на корелација за утврдување на статистичката поврзаност помеѓу бројот на машински интервенции и стапката на деградација на колосекот [62, 131].

Формула за Pearson-ов коефициент на корелација [176]:

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

каде што:

- X_i е бројот на подбивања,
- Y_i е стапката на деградација,
- $\bar{X}$ и $\bar{Y}$ се просечни вредности на бројот на подбивања и деградација.
- Вредности на r блиску до $+1$ покажуваат силна позитивна корелација – т.е. со зголемување на бројот на подбивања се зголемува и стапката на деградација (можен знак за реактивно, неефективно одржување).
- Вредности блиску до -1 означуваат силна негативна корелација, што може да укаже дека подбивањето има позитивен ефект во намалување на деградацијата.
- Вредности блиску до 0 покажуваат слаба или никаква линеарна поврзаност.

Овој тип анализа не може да утврди причинско-последични односи, туку само статистичка линеарна зависност помеѓу две променливи. Исто така, Pearson-овиот коефициент на корелација е чувствителен на аномалии и негира можни одложени или сложени ефекти. Поради тоа, подолу во трудот е применета мултиваријантна регресија која овозможува подетално моделирање на влијанието [62].

6.11.3. Мултиваријантна регресија по тип и период на интервенции

Главна цел на оваа анализа е да се испита поврзаноста (причинско-последична) и временски зависна поврзаност помеѓу бројот на активности за регулирање на колосекот и подбивање на засторот и промената на квалитетот на колосекот, изразена преку TQI (Track Quality Index). Регресионата анализа овозможува:

- Прецизна квантификација на влијанието на секој тип интервенција (регулирање на колосекот и подбивање на засторот) врз стапката на деградација;
- Разликување помеѓу реактивни интервенции (изведени по значително влошување на состојбата) и проактивни интервенции (спроведени навремено, со очекуван ефект врз идната стабилност);
- Идентификација на статистички значајни параметри преку анализа на p -вредности и интервали на доверба;
- Развој на насочени стратегии за одржување, засновани врз емпириски потврдени ефекти.

Во претходната корелациона анализа беше испитано постоењето на статистичка поврзаност помеѓу променливите, но без можност да се утврди насоката, интензитетот или временската зависност на таа врска. Токму овие аспекти се дополнително разјаснети преку примената на мултиваријантна регресиона анализа.

Методолошки пристап

Во рамките на анализата се применети три одделни мултиваријантни регресиони модели од типот обични најмали квадрати OLS (Ordinary Least Squares), по еден за секој од анализираните временски интервали на деградација: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024. Зависната променлива во секој модел е стапката на деградација на индексот на квалитет на колосекот (TQI), додека како независни променливи се вклучени бројот на извршени интервенции за регулирање на колосекот и подбивање на засторот, распределени по соодветните временски интервали [79].

Формално, регресионата равенка ја има следнава структура:

$$\text{Degradacija}_i = \beta^0 + \beta^1 \cdot X_{\text{kol}_{17}-19} + \beta^2 \cdot X_{\text{kol}_{19}-22} + \beta^3 \cdot X_{\text{kol}_{22}-24} + \beta^4 \cdot X_{\text{zas}_{17}-19} + \beta^5 \cdot X_{\text{zas}_{19}-22} + \beta^6 \cdot X_{\text{zas}_{22}-24} + \varepsilon$$

каде што:

- X_{kol} се бројот на активности за регулирање на колосекот,
- X_{zas} се бројот на активности за подбивање на засторот,
- β_i се регресионите коефициенти кој го квантифицираат ефектот на независната променлива X_i врз зависната променлива Y .,
- ε е стохастичка грешка.

Резултатите од мултиваријантната регресија се анализираат врз основа на следниве елементи:

- **Регресиони коефициенти (β_i):** Секој коефициент од регресионата анализа ја претставува очекуваната просечна промена на стапката на деградација на индексот на квалитет на колосекот (TQI) при зголемување за една единица на бројот на интервенции од соодветниот тип и временски интервал, под претпоставка дека сите други променливи во моделот остануваат константни.
- **Негативна вредност на коефициентот ($\beta_i < 0$)** означува дека интервенцијата е поврзана со забавување на деградацијата (позитивен ефект);
- **Позитивна вредност ($\beta_i > 0$)** укажува на потенцијално влошување на состојбата, односно забрзување на деградациониот процес [175].
- **p-вредности (p-values):** p-вредноста претставува веројатност да се добие набљудуваниот ефект (или поголем) доколку навистина не постои реална врска помеѓу независната и зависната променлива. Таа служи како индикатор за статистичката значајност на секој регресионен коефициент, односно проценетата вредност на коефициентот од регресионата анализа е различен од 0.
Вредности на $p < 0.05$ се сметаат за статистички значајни во интервал на доверба од 95%, што значи дека постои доволна основа да се прифати дека променливата има реален ефект врз стапката на деградација на TQI.
Вредности повисоки од 0.05 покажуваат недоволна статистичка значајност, што може да значи дека дадената променлива нема суштинско влијание во рамки на анализираниот модел [177].
- **Интервал на доверба (Confidence Interval):** Покрај p-вредностите, секој регресионен коефициент е придружен со интервал на доверба, најчесто на ниво од 95%, кој претставува интервал на вредности во кој, со високо ниво на сигурност, се очекува да се наоѓа вистинската (непозната) вредност на β -коефициентот добиен со регресионата анализа. Потесните интервали значат поголема прецизност и стабилност на проценката, додека поширок интервал може да значи поголема несигурност, варијација во податоците или недоволен број на податоци од набљудувања [178].

Оваа анализа претставува највисок степен на квантитативна проценка на ефектите од машинските интервенции врз состојбата на колосекот. Добиените резултати овозможуваат:

- Препознавање на најнефективните типови интервенции и нивни периоди на делување;
- Разграничување меѓу интервенции со директен и одложен ефект;
- Врз основа на значајноста и насоката на ефектите – моделирање на приоритети за одржување, со акцент на стабилност, ефективност и инженерска оправданост;
- Идентификација на интервенции со статистички недоволен ефект, кои може да се преиспитаат или оптимизираат во идните стратегии;

- Обезбедување основа за симулациски пристапи и сценарија, при што се испитува ефектот од различен број и тип на интервенции врз долгорочната стабилност на колосекот [79, 175].

6.12. Оптимизација на бројот на машински интервенции

Основна цел на оваа анализа е да се определи оптималниот број машински интервенции – конкретно, регулирање на колосекот и профилирање на засторот – во рамки на дефиниран временски интервал, така што ќе се постигне една од следниве цели:

- минимизирање на долгорочната стапка на геометриска деградација, или
- максимизирање на краткорочниот позитивен ефект од интервенцијата.

Анализата има за цел да обезбеди објективна и квантитативно поткрепена поддршка при донесување одлуки во процесот на планирање и оптимизација на мерките за одржување, притоа земајќи го предвид фактот дека:

- честите интервенции не секогаш резултираат со пропорционално подобрување на состојбата,
- прекумерните машински интервенции можат да доведат до нарушување на структурата и носивоста на засторот, а со тоа и до пренос на деградацијата кон долниот строј, што резултира со прогресивна долгорочна нестабилност на колосекот.

Анализата ја разгледува интеракцијата помеѓу бројот на извршени интервенции и геометриската реакција на трасата (преку TQI вредности) во различни временски интервали, со цел да се идентификува точката на оптимум по кластер или по делница.

Со цел да се евалуира ефектот од различен број машински интервенции врз динамиката на деградација на колосекот, за секој временски интервал (2017–2019, 2019–2022, 2022–2024) изграден е независен регресиски модел со примена на алгоритмот Random Forest. Овој избор поттикнат е од следниве својства на алгоритмот:

- способност за детекција на сложени и нелинеарни односи помеѓу бројот на интервенции и стапката на деградација,
- висока робустност на нерегуларности во податоците,
- стабилност при работа со ограничени или нецелосни бази на податоци, што е особено релевантно во инфраструктурни анализи со дисперзна распределба на интервенциите.

Моделите се обучени со следната конфигурација:

- Влезен параметар, карактеристики: број на извршени машински интервенции (регулирање на колосек и подбивање на застор) во рамки на анализираниот период.
- Целна променлива : пресметана годишна стапка на деградација на TQI за истиот временски интервал, изразена како $\Delta TQI/km/year$.

За секој модел применет е 5-fold cross-validation за стабилна проценка на перформансите, а Grid Search се користи за симулација на ефектот од различен број на интервенции врз целната променлива, со цел идентификација на точката на оптимум.

6.12.1. Симулација со техника на решетка – пребарување на мрежа (Grid Search)

Откако е обучен Random Forest моделот за секој временски интервал, се спроведува Grid Search симулација со цел да се утврди како целната променлива, годишната стапка на

деградација на TQI, се менува во зависност од бројот на машински интервенции [62]. Овој пристап овозможува емпириска идентификација на оптималниот број регулирање на колосекот, при кој се постигнува најниска стапка на деградација.

Во рамки на симулацијата, бројот на машински интервенции на регулирање на колосекот (означен како n) се варира во дискретен опсег од 0 до 5 интервенции по временски интервал. За секоја вредност на n , се користи претходно обучениот Random Forest модел за да се симулираат две целни функции:

- Краткорочен ефект – мерен преку очекуваната апсолутна промена на TQI веднаш по интервенцијата, во однос на вредноста пред интервенцијата;
- Долгорочен ефект – мерен преку просечната годишна стапка на деградација на TQI во периодот по интервенцијата ($\Delta TQI/km/year$).

Овој двоен критериум овозможува паралелна анализа на непосредниот (краткорочен) и акумулираниот (долгорочен) ефект од интервенциите, што е од суштинско значење при формулирање на ефективна стратегија за одржување [179]. Целта е да се идентификува вредноста на n при која се постигнува:

- максимално подобрување на TQI на краток рок, и/или
- минимална годишна стапка на деградација на долг рок,
- без појава на заситување или негативен повратен ефект од претерано одржување.
- **Краткорочен ефект**

Краткорочниот ефект ја претставува непосредната промена во квалитетот на геометријата на колосекот веднаш по спроведената интервенција, и се користи како индикатор за нејзината краткорочна ефективност. Оваа мерка е особено значајна при планирање на интервенции во ситуации кога е потребно брзо подобрување на состојбата на трасата, како што се:

- подготовка за техничка инспекција,
- зголемен обем на железнички сообраќај,
- обезбедување стабилност на колосекот пред критични периоди (зима, обилни врнежи и сл.) [129].

Краткорочниот ефект се дефинира како разлика помеѓу симулираната вредност на TQI (за даден број на интервенции n) и реално измерената вредност на TQI на крајот од соодветниот период:

$$\Delta TQI_n = TQI_{\{\{\text{симулирано}\},n\}} - TQI_{\{\{\text{реално}\}\}}$$

Оваа мерка служи како индикатор за непосредната ефективност на интервенциите. Пониски вредности на ΔTQI_n означуваат поголемо подобрување на геометријата по интервенцијата, што е особено значајно во контекст каде што се бара брзо подобрување, на пример, при подготовки за техничка инспекција, при зголемен сообраќаен интензитет или други краткорочни оперативни приоритети [129].

- **Долгорочен ефект**

Долгорочниот ефект се однесува на прогнозираното темпо на деградација на геометријата на колосекот низ време, во зависност од различните нивоа на извршени машински интервенции. Овој индикатор претставува основа за инженерско – долгорочно планирање на мерки за одржување, бидејќи овозможува проценка на одржливоста на постигнатиот квалитет под различни сценарија за одржување.

За секоја вредност на n (број на интервенции во даден временски интервал), се пресметува стапката на деградација δ_n со помош на тренираниот Random Forest модел, според функцијата:

$$\delta_n = f(n)$$

каде што:

- δ_n ја претставува очекуваната годишна стапка на влошување на TQI (на пр. $\Delta TQI/km/period$),
- $f(n)$ е функција за предвидување научена од податоците.

Оваа функција ја отсликува долгорочната стабилност и отпорност на колосекот на геометриско влошување под различни нивоа на активности за одржување. Пониски вредности на δ_n сигнализираат побавно влошување, што укажува на поповолен долгорочен ефект од интервенцијата [180].

Оваа мерка е клучна за идентификување на:

- ефективниот обем на интервенции кој обезбедува трајна стабилност,
- точката на заситување, по која дополнителните интервенции не даваат значајно подобрување,
- потенцијални негативни ефекти од прекумерно одржување, поврзани со дестабилизација на конструкцијата на колосекот.

Преку анализа на трендот на δ_n , се овозможува формулирање на оптимални стратегии за одржување, прилагодени на типот на делница, кластерската припадност и долгорочните експлоатациони барања.

- **Комбиниран пристап**

Симулацијата спроведена со пребарување во мрежа (Grid Search) техника овозможува, за секоја вредност на бројот на интервенции n , да се добие пар вредности од формата:

$$(n, \Delta TQI_n), \quad (n, \delta_n)$$

Оваа структура овозможува паралелна проценка на краткорочниот и долгорочниот ефект од интервенциите, преку интегрирана анализа на моменталната добивка во квалитетот и прогнозираното темпо на влошување. На тој начин се овозможува подлабоко разбирање на динамиката на одговорот на колосекот на различни нивоа на машински активности низ две временски димензии:

- итно подобрување (преку ΔTQI_n), и
- долгорочна стабилност (преку δ_n) [181].

Врз основа на добиените резултати, можно е да се дефинира оптимален број интервенции n^* , согласно со избраниот инженерски критериум, како што се:

- максимално краткорочно подобрување, односно вредност на n при која ΔTQI_n е минимално;
- минимална долгорочна деградација, односно вредност на n при која δ_n е најниска;
- избалансиран компромис помеѓу двата ефекта, односно вредност на n при која се постигнува оптимален однос помеѓу ΔTQI_n и δ_n , при што се обезбедува задоволително подобрување на геометријата со истовремено одржување на долгорочната стабилност на трасата.

Овој комбиниран пристап овозможува систематско и технички засновано утврдување на оптималниот број интервенции, при што се балансираат потребата за итни интервенции и барањата за долгорочна стабилност на колосекот [181].

6.12.2. Интегрална анализа по интервали

По спроведената симулација со техника на решетка (Grid Search) за секој временски интервал поединечно (2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024), следи интегрална анализа со цел да се обезбеди конзистентна и објективна проценка на ефектот од бројот на активности на подбивање на колосекот низ целиот анализиран период.

Овој пристап е од суштинско значење при формулирање на општи препораки за машинско одржување, затоа што овозможува да се идентификуваат вредности на број на интервенции што покажуваат доследно позитивен ефект во сите анализирани временски интервали. Со тоа се издвојуваат оние нивоа на интервенција што даваат резултати независно од конкретната временска рамка или почетната состојба на трасата.

На овој начин се воспоставува врска меѓу ефектот на интервенциите во поединечен интервал (локална ефективност) и нивното акумулирано влијание низ време (долгорочна стабилност). Ова е клучно за развој на стратегија за одржување што е долгорочно одржлива и применлива на ниво на целата железничка мрежа [181].

За да се изврши интегрална проценка на ефектот од бројот на интервенции, за секоја вредност на $n \in \{0,1,2,3,4,5\}$, се пресметуваат следните агрегирани мерки базирани на резултатите од трите анализирани временски интервали:

- **Средна вредност на краткорочното подобрување:**

$$\overline{\Delta TQI_n} = \sum_{i=1}^3 \Delta TQI_{n,i}$$

каде што

- $\Delta TQI_{n,i}$ е симулираното краткорочно подобрување на геометријата на колосекот во i -тиот временски интервал, за даден број на интервенции n ;
- индексот i се однесува на интервалите:
 - $i=1$ за 2017–2019,
 - $i=2$ за 2019–2022,
 - $i=3$ за 2022–2024.

- **Средна вредност на долгорочната стапка на деградација:**

$$\overline{\delta_n} = \sum_{i=1}^3 \delta_{n,i}$$

каде што

- $\delta_{n,i}$ е симулираната годишна стапка на деградација во i -тиот временски интервал, за даден број на интервенции n .

Со овие пресметки, за секое ниво на интервенции n се добиваат просечни вредности на двете клучни целни функции, краткорочното подобрување и долгорочната стапка на деградација, кои заеднички го отсликуваат интегралниот ефект од регулирањето на

колосекот. Овој пристап овозможува споредлива и систематска евалуација на влијанието од различни нивоа на одржување низ целиот анализиран временски интервал [181].

Интегралната анализа има за цел да обезбеди стратегиски увид во влијанието на различниот број интервенции, преку следните конкретни цели:

- Идентификација на вредности на n што доследно резултираат со високи краткорочни подобрувања и/или ниска долгорочна стапка на деградација, независно од временскиот интервал;
- Препознавање на трендови на заситување (diminishing returns), односно точки по кои дополнителните интервенции не придонесуваат за значајно подобрување и може да резултираат со негативен ефект врз стабилноста на конструкцијата;
- Формирање на квантитативна основа за избор на компромисно решение, особено во случаи кога краткорочниот и долгорочниот ефект се во конфликт, при што се овозможува информиран инженерски избор базиран на приоритетите на експлоатацијата и достапните ресурси.

Оваа интегрална анализа обезбедува синтетички и споредлив преглед на резултатите, при што се заокружува квантитативната евалуација на ефектите од интервенциите и се поставува основата за следната фаза – идентификација на оптималните точки според однапред дефинираните краткорочни, долгорочни или комбинирани критериуми [181, 182].

6.12.3. Дефинирање на оптимални точки

Врз основа на резултатите од симулациите и пресметаните агрегирани мерки — средната вредност на краткорочното подобрување $\overline{\Delta TQI_n}$ и средна вредност на долгорочната стапка на деградација $\overline{\delta_n}$, се идентификуваат две клучни оптимални вредности на бројот на интервенции n , секоја според различен критериум на оптималност:

- Оптимална точка n_1 : Вредност на n за која средната вредност на краткорочното подобрување $\overline{\Delta TQI_n}$ е минимална. Оваа точка го претставува бројот на интервенции кој води до најголемо моментално подобрување на геометријата на колосекот, споредено со реалната состојба на крајот од периодот. Таа е особено релевантна во ситуации каде, приоритет е да се постигне брза стабилизација или видлив ефект од одржувањето.
- Оптимална точка n_2 : Вредност на n за која средната долгорочна стапка на деградација $\overline{\delta_n}$ е минимална. Оваа точка го претставува бројот на интервенции што резултира со најмало годишно влошување на TQI , односно со највисока стабилност на колосекот низ време. Таа е особено значајна при стратегиско планирање за одржливост на колосекот.

Вообичаено, вредностите n_1 и n_2 не се совпаѓаат, бидејќи тие ја рефлектираат разликата меѓу двата основни приоритета во управувањето со одржувањето: од една страна, итно подобрување на тековната состојба на колосекот, и од друга страна, осигурување на долгорочна структурна стабилност и минимизирање на деградацијата низ време [62].

Оваа разлика условува стратешки избор при дефинирањето на препорачаната вредност на интервенции, при што одлуката зависи од контекстот на експлоатација, техничките барања и достапните ресурси. Во тој поглед, се разгледуваат следниве сценарија:

- Ако е приоритет долгорочната стабилност и структурна сигурност на трасата, се избира точката n_2 . Ова е особено применливо при долгорочни инвестициони

стратегии, кога целта е да се продолжи животниот век на инфраструктурата, да се намали потребата од зачестени интервенции, и да се обезбеди стабилна траса со минимални долгорочни трошоци за одржување;

- Ако е приоритет постигнување на моментален визуелен и оперативен ефект, се избира точката p_1 . Овој избор е оправдан во ситуации на краткорочни експлоатациони барања, како што се подготовки за технички ревизии или инспекции, привремен зголемен сообраќаен интензитет, или потреба за итна интервенција поради локални дефекти или нарушувања на геометријата.

Во случаи кога постојат буџетски, временски или логистички ограничувања, може да се избере компромисна вредност p^* помеѓу p_1 и p_2 , односно вредност која не претставува екстреман максимум ниту минимум, но обезбедува прифатлив биланс помеѓу краткорочната ефективност и долгорочната стабилност. Овој избор е оправдан кога е потребна рационализација на ресурсите, а сепак се настојува да се зачува техничката сигурност и квалитет на колосекот на задоволително ниво [62].

Овој рационален и квантитативно заснован пристап овозможува флексибилно инженерско управување со бројот на интервенции, прилагодено на специфичните услови на трасата. За разлика од одлуки базирани на интуитивни проценки или административни норми, предложениот модел се потпира на симулирани сценарија и аналитички мерки, што овозможува прилагодливо и објективно донесување одлуки во различни експлоатациони, технички и економски услови.

6.13. Ограничувања на методологијата

И покрај деталната и ригорозна структура на предложената методолошка рамка, постојат неколку суштински ограничувања што треба да се земат предвид при интерпретација на резултатите и при нејзина примена во различни инфраструктурни или експлоатациони услови.

6.13.1. Ограничувања поврзани со достапноста и квалитетот на податоците

Едно од основните ограничувања се однесува на нерегуларните интервали на мерење на геометријата на колосекот. Анализата е изведена врз основа на мерења спроведени во интервали од две до три години, што го ограничува континуитетот во следење на промените меѓу мерењата. Дополнително, периодот 2019–2022 беше исклучок поради пандемијата и прекините во редовното сообраќање на патничките возови, додека товарниот сообраќај се одвивал со намален, но стабилен интензитет. Оваа промена во структурата на сообраќајот резултираше со намалена експлоатациона активност на трасата и го отежна споредувањето на резултатите меѓу поединечни интервали.

Понатаму, ограничен број на податоци за интервенции по делници претставува друг значаен фактор кој влијае врз стабилноста на моделите и статистичката сигурност на резултатите. За одредени делници е достапен ограничен број на евидентирани активности на машинско регулирање, што ја намалува репрезентативноста на примерокот и го ограничува просторот за поширока генерализација.

Дополнително, техничката евиденција за спроведените интервенции е ограничена по обем и локација. Често се евидентира само датумот и типот на интервенцијата, без детални технички параметри како што се длабочината на набивање, користената технологија, брзината и интензитетот на машината. Ова ја ограничува можноста за квантификација на нивниот реален ефект и прецизноста на понатамошните модели за предвидување.

6.13.2. Ограничувања на моделите за предвидување

Бројот на временски точки достапни за анализа на стапката на деградација е ограничен на три временски интервали (2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024), што претставува релативно кратка временска серија. Ова го ограничува капацитетот за сигурна долгорочна екстраполација и ја намалува доверливоста на прогнозите надвор од анализираните интервали. Дополнително, во периодот 2019–2022 се забележува атипична редукција на железничкиот сообраќај, што влијае на нормалната динамика на деградација и го комплицира објективното оценување на резултатите.

Одредени модели, особено оние што бараат стабилни и континуирани временски серии, како што се Support Vector Regression (SVR) и Multilayer Perceptron (MLP), покажуваат ограничена способност за генерализација на трендовите при мали или нестабилни податочни множества. Нивната чувствителност кон аномалии и нерамномерна фреквенција на интервенции може да доведе до пониска репрезентативност и стабилност на резултатите.

Понатаму, изборот на параметрите со Grid Search техника е ограничен на дискретен опсег од $n = 0$ до $n = 5$ интервенции, што овозможува квантификација само во рамките на дефинирани граници. Иако овој пристап е соодветен за компаративна анализа, не ја опфаќа целосно можната низа на интервенциски сценарија и не ги опишува сите потенцијални комбинации на фактори што влијаат врз деградацијата на колосекот.

6.13.3. Ограничувања на регресионите анализи

Регресионите анализи имаат одредени вградени ограничувања поврзани со формата на зависност што ја претпоставуваат меѓу променливите. Статистичките регресиски модели, како линеарната и полиномната регресија, се базираат на претходно дефинирана (фиксна) форма на релација, што ги прави помалку флексибилни при моделирање на сложени или нелинеарни процеси. Како резултат на тоа, овие модели не можат секогаш соодветно да ги опфатат варијабилните влијанија што се појавуваат при различен интензитет или фреквенција на интервенции, ниту пак да ја прилагодат својата структура кон променливи услови на експлоатација и одржување.

6.13.4. Ограничувања на интерпретација и примена

Главното ограничување при интерпретацијата се однесува на причинско-последичните врски. Иако се применети модели што овозможуваат квантитативна проценка на влијанието од интервенциите врз индексот на квалитет на колосекот (TQI), не може со сигурност да се утврди дали забележаните подобрувања или влошувања се резултат на тие интервенции или на други независни фактори. На пример, геотехничките карактеристики на теренот, појавата на скриени подповршински оштетувања или зголемен обем на сообраќај можат истовремено да влијаат врз деградацијата и да ги променат ефектите од спроведените машински активности.

Развиената методологија заснована е врз специфични карактеристики на железничката делница Колашин – Подгорица, вклучувајќи геометрија, инфраструктурни елементи и практики на одржување. Поради тоа, нејзината директна примена на други железнички системи бара внимателна адаптација кон локалните услови и техничките параметри на трасата.

Овие ограничувања не ја доведуваат во прашање валидноста на применетата методолошка рамка, туку бараат внимателна интерпретација на резултатите и одговорен инженерски пристап при нивна примена. Дополнително, тие отвораат простор за идни

истражувања насочени кон проширување на моделите со подетални и почести мерења, подобрување на временската резолуција и вклучување на дополнителни инфраструктурни и оперативни променливи. Иако развиениот пристап е прилагоден на специфичните услови на делницата Колашин – Подгорица, неговите принципи се применливи и на други железнички системи, под услов да се адаптираат параметрите на моделот согласно локалните услови. Во идни инженерски анализи се препорачува зголемена просторна и временска фреквенција на податоците, како и стандардизирана евиденција на интервенциите, со цел зголемување на стабилноста и моќ за предвидување на моделите.

7. РЕЗУЛТАТИ

Резултатите од спроведените анализи, предвидувања и пресметки за железничката делница Колашин – Подгорица (2017–2024) презентирани се на начин кој ја олеснува нивната интерпретација. Секој од добиените резултати е тесно поврзан со целите на истражувањето, методолошката рамка и применетите аналитички пристапи. Анализите се класифицирани според нивниот тип: статистички модели, модели базирани на машинско учење, анализа на деградација, кластеризација и оптимизација на машински интервенции за одржување.

Резултатите се организирани почнувајќи од проценка на важноста на параметрите и предиктивните модели за TQI, кои ја поставуваат основата за понатамошни анализи. Потоа следат истражувањата на деградацијата и влијанието на машинското одржување, додека на крај се презентирани симулациите за оптимален број интервенции. Секој дел содржи графички и табеларни прикази, пресметани индикатори и инженерска интерпретација.

Овие резултати претставуваат основа за формулирање конкретни заклучоци, инженерски препораки и стратегии за ефективно управување со железничката инфраструктура.

7.1. Проценка на важноста на параметрите (Feature Importance) со примена на Random Forest

Во рамките на анализата на факторите што најмногу влијаат на вредноста на индексот на квалитет на колосекот (TQI), направена е проценка на важноста на параметри преку примена на Random Forest модел и Leave-One-Out Cross Validation (LOOCV) техника за валидација. Целта е да се идентификуваат највлијателните променливи кои треба да се приоритизираат во моделирањето и инженерското планирање.

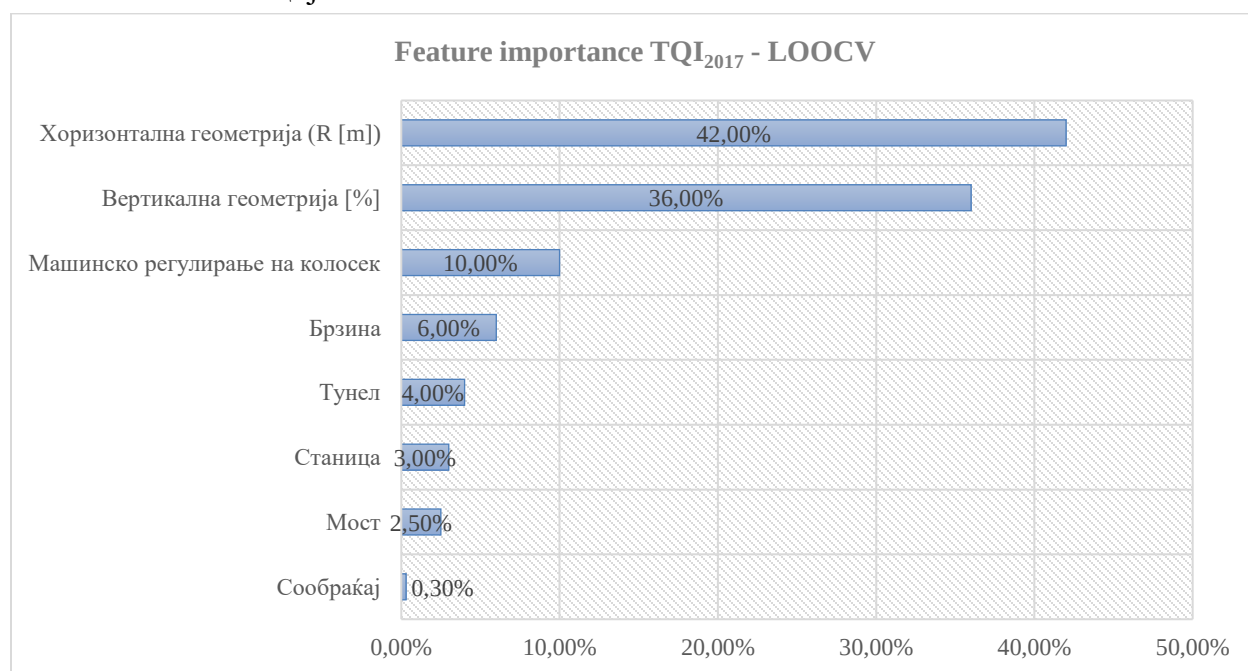
7.1.1. Влијание на поединечни фактори врз TQI во 2017 година

Анализата на важноста на параметрите за моделот на TQI во 2017 година покажува доминантно влијание на геометриските параметри, каде што најголема важност има радиусот на закривеност на железничката траса (R [m]) со вредност од 42%, следен од надолжните наклони [%] со 36% учество. Овие параметри го дефинираат геометрискиот облик на трасата и имаат директно влијание врз рамномерното пренесување на оптоварувањата од возилата на колосекот. Помалите радиуси и поголемите надолжни наклони создаваат зголемени динамички сили, што води до зголемени динамички оптоварувања и забрзано абење на шините и тркалата, што резултира со забрзана деградација на колосекот.

Токму овие карактеристики се присутни на значителен дел од делницата Колашин – Подгорица. Постојат кривини со радиус од 300 до 500 метри, додека делници од трасата се наоѓаат на стрмен терен со наклони што често достигнуваат 25%. Во такви услови, при експлоатација со стандардни брзини од околу 60 km/h, се јавуваат зголемени попречни сили и вертикални оптоварувања, што доведува до поинтензивно абење и нестабилност на геометријата. Овие услови ја објаснуваат високата важност на геометриските параметри при моделирањето на состојбата на колосекот.

Машинското регулирање на колосекот (8%) и дозволената брзина (7%) се идентификувани како параметри со умерена важност во моделот за 2017 година, што потврдува дека и активностите за одржување и динамичките услови на експлоатација влијаат врз вредностите на индексот на квалитет на колосекот (TQI). Машинското

регулирање на колосекот најчесто се прави како одговор на постоечки геометриски нестабилности, при што неговата важност во моделот значи дека во делниците со полоша геометриска состојба веќе биле присутни интервенции за стабилизирање. Ограничувањата во брзината, кои на трасата варираат од 40 до 60 km/h, влијаат на интензитетот на динамичките оптоварувања, особено кај делници со мали радиуси и стрмни надолжни наклони, каде повисоките брзини дополнително го засилуваат процесот на деградација. Според упатствата на UIC (UIC 714, UIC 518), брзината се вклучува во пресметката на ефективното дневно сообраќајно оптоварување преку коефициент на брзина S , кој ги коригира динамичките влијанија. За референтна вредност од 60 km/h се применува $S = 1$, што претставува основен услов за споредување на делници со различни брзински режими. Зголемувањето на брзината го зголемува и динамичкото оптоварување, што резултира со побрзо акумулирање на геометриски неправилности и со пократок период на стабилна експлоатација на колосекот.

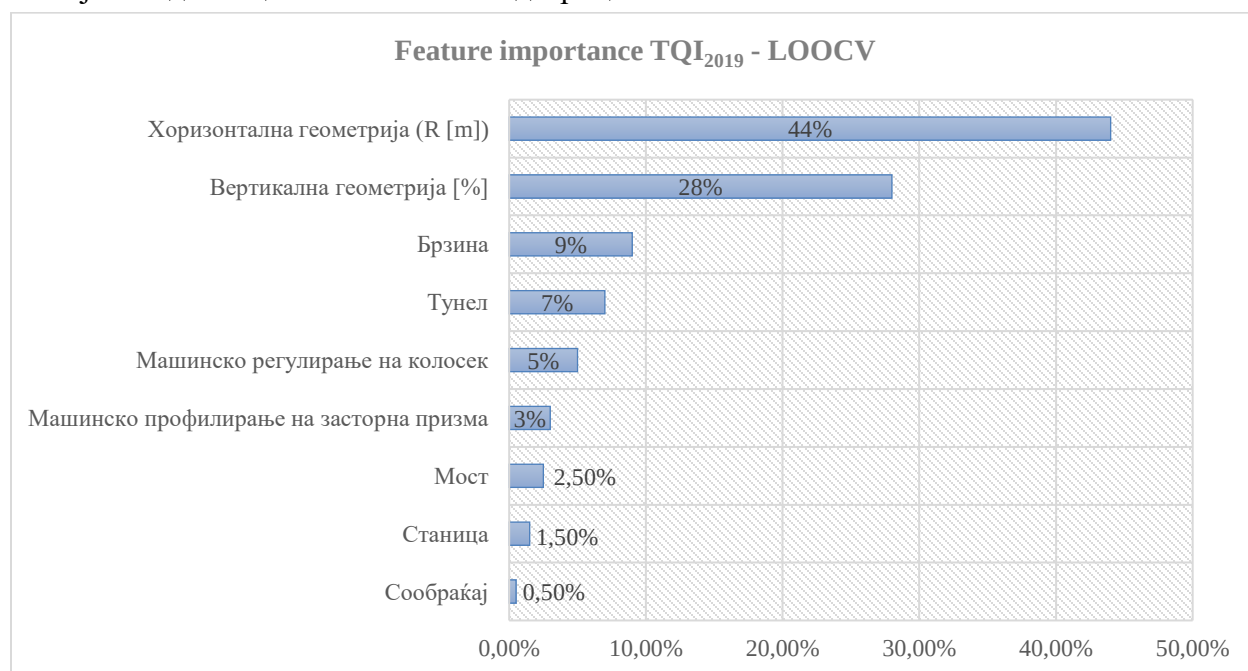


Слика 48. Визуелизација на важноста на променливите за моделот на TQI во 2017 година, добиена со Random Forest и LOOCV. (Извор: Сопствени пресметки)

Параметрите поврзани со инфраструктурни објекти, како тунели, станици и мостови, покажуваат ниска вредност на важност во моделот за 2017 година (под 5%), што значи дека нивното влијание врз TQI било ограничено. Според реалните податоци, тунелите се присутни на приближно една четвртина од должината на трасата (24%), додека мостовите и станиците се јавуваат на помалку од 5% од делницата Колашин – Подгорица, што ја објаснува ограничената статистичка значајност во моделот. Машинското обликување на засторот, исто така покажува минимално влијание, со просечно помалку од една интервенција по делница и мала просторна варијација. Додека вредноста на бруто сообраќајот е иста за целата должина на трасата, поради што овој параметар не може да даде информација за разлики во состојбата на колосекот и останува без значајно влијание во моделот.

7.1.2. Влијание на поединечни фактори врз TQI во 2019 година

Во 2019 година се задржува истата доминација на геометриските параметри во објаснувањето на индексот на квалитет на колосекот. Радиусот на закривеност повторно се издвојува како највлијателен параметар со важност од 44%, што се поврзува со неговото директно влијание врз стабилноста на возењето и појавата на бочни сили, особено во делници со остри кривини. Надолжниот наклон останува втор најзначаен фактор, со вредност од 28%, што претставува умерено намалување во споредба со 2017 година. Оваа промена може да се објасни со тоа што, и покрај присуството на стрмни делници, дел од најризичните делници веројатно веќе биле предмет на интервенции за одржување. Стабилноста на геометриските параметри како највлијателни низ двете последователни анализи дополнително ја потврдува нивната клучна улога во дефинирањето на долгорочната состојба на делницата Колашин – Подгорица.



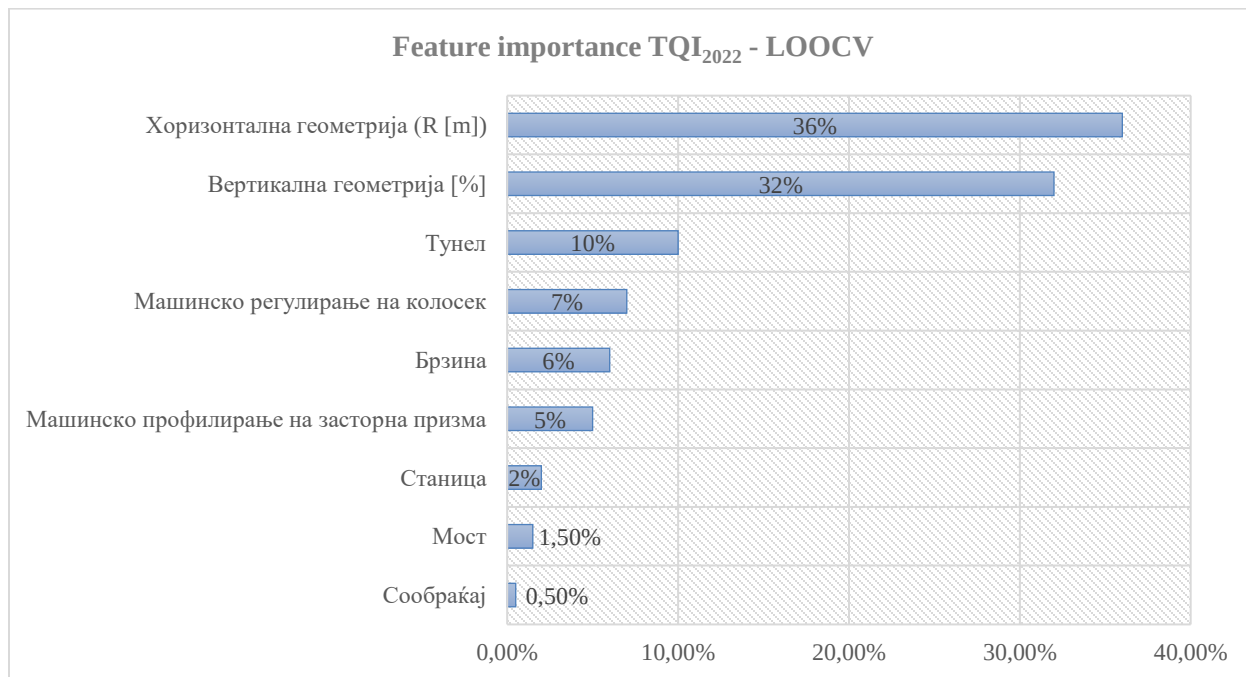
Слика 49. Визуелизација на важноста на променливите за моделот на TQI во 2019 година, добиена со Random Forest и LOOCV. (Извор: Сопствени пресметки)

Во 2019 година забележано е зголемено влијание на параметарот што ги означува делниците кои се протегаат во тунели (7%). Ова е во согласност со високата застапеност на делници во тунели, околу 24% од должината на делницата се протега во тунели, што го зголемува нивното статистичко присуство во моделот. Зголемената важност на овој параметар се должи на ограничените услови за одржување, акумулацијата на влага и лошото одводнување во тунелските делници од трасата, што со текот на време доведува до поголеми геометриски деградации. Оперативната брзина, со важност од 9%, покажува засилено влијание во однос на претходната година, што се должи на реалната варијација на дозволените брзини низ делницата, од 40 до 60 km/h, особено на делници каде што се комбинираат мали радиуси и значителни надолжни наклони, што ја зголемува чувствителноста на трасата на динамичките влијанија. Останатите параметри, машинско регулирање на колосекот, обликување на засторот, присуство на мостови, станици и вкупен интензитет на сообраќај – покажуваат маргинално влијание врз индексот на квалитет на колосекот (TQI) во оваа година. Овие променливи имаат или многу слаба застапеност (како

кај мостовите и станиците, кои се појавуваат на помалку од 5% од делницата), или речиси идентични вредности по целата траса (како кај подбивањето и бруто сообраќајот), што ги прави неефективни во објаснувањето на разликите во состојбата на колосекот.

7.1.3. Влијание на поединечни фактори врз TQI во 2022 година

Во 2022 година, радиусот на закривеност (36%) и надолжниот наклон (32%) се потврдуваат како највлијателни параметри врз индексот на квалитет на колосекот (TQI), што ја нагласува континуираната доминација на хоризонталната и вертикалната геометрија на трасата како клучен фактор за стабилноста на колосекот. Истовремено, се бележи зголемено влијание на инфраструктурните објекти, особено присуството на тунели (10%) и повисока важност на параметрите поврзани со машинско регулирање на колосекот и обликување на засторот, кои првпат влегуваат во групата на повлијателни фактори. Податоците покажуваат дека во периодот меѓу двете мерења, односно од 2019 до 2022 година, просечно се извршени 1.4 машински регулирања на колосекот и 0.9 подбивања на засторот на секои 20m (хомогени делници), што го објаснува нивното зголемено значење. Ова значи дека состојбата на колосекот сè повеќе зависи од фреквенцијата и квалитетот на одржувањето, особено на делници со сложени геометриски или инфраструктурни карактеристики. Оперативната брзина има умерено влијание (6%), додека параметрите како станица, мост и сообраќаен интензитет покажуваат многу ниско влијание врз вредностите на индексот на квалитет на колосекот TQI. Ова се должи на тоа што станиците и мостовите се појавуваат само кај мал број делници, а вредноста на бруто сообраќајот е идентична за целата делница, што ги прави статистички нерелевантни за процена на локалната состојба на колосекот.

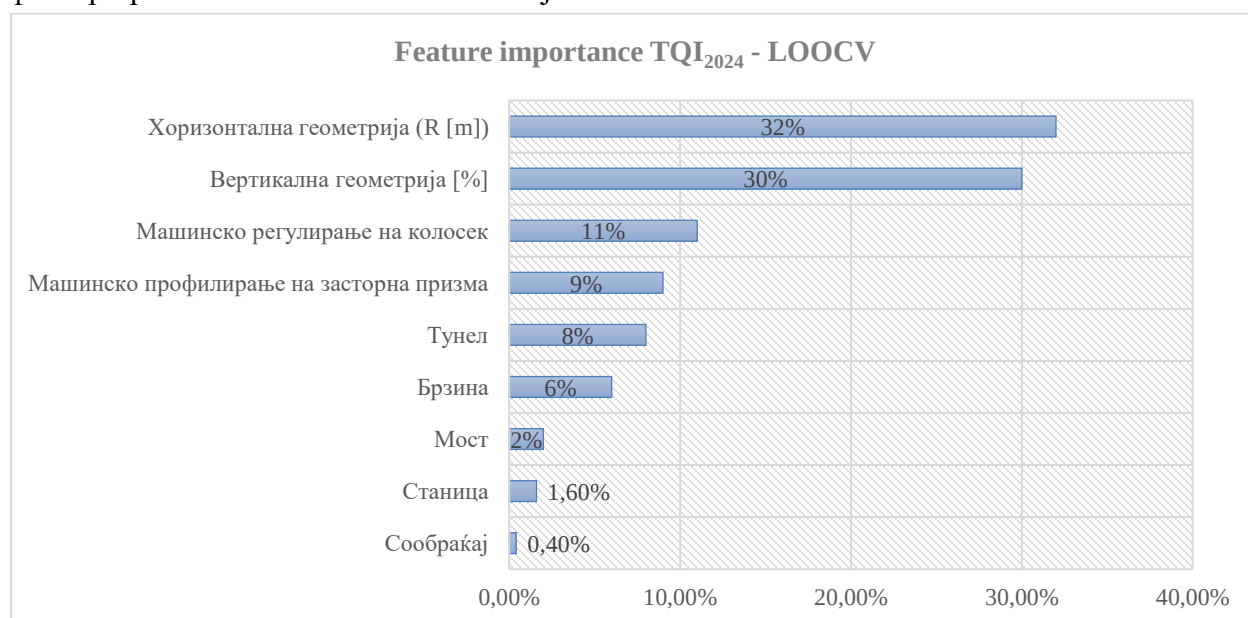


Слика 50. Визуелизација на важноста на променливите за моделот на TQI во 2022 година, добиена со Random Forest и LOOCV. (Извор: Сопствени пресметки)

7.1.4. Влијание на поединечни фактори врз TQI во 2024 година

Во последниот анализиран период во 2024 година геометриските параметри, радиусот на закривеност (32%) и надолжниот наклон (30%) повторно се издвојуваат како највлијателни фактори, со што се потврдува нивната доминантна улога во дефинирањето на

долгорочната стабилност на колосекот. Истовремено, се забележува зголемување на влијанието на параметрите поврзани со машинско регулирање на колосекот (11%) и обликување на засторот (9%), што се должи на поинтензивните интервенции за одржување направени во периодот меѓу двете мерења, односно 2022 – 2024 година. Во овој интервал, просечно се извршени 1.56 регулирања на колосекот и 0.94 подбивања на засторот по хомогена делница со должина од 20 метри, што претставува највисоко ниво во споредба со претходните години и го покажува зголемениот интензитет на активности за стабилизирање и одржување на колосекот. Присуството на тунели и оперативната брзина имаат умерено влијание, додека факторите како присуство на мост и станица и бруто сообраќај не покажуваат значаен придонес во моделот. Ова се должи на тоа што мостовите и станиците се застапени на помалку од 5% од делницата, а вредноста на сообраќајот е идентична за сите целата должина на делницата Колашин – Подгорица, што го исклучува како влијателен фактор при анализа на локалната состојба на колосекот.

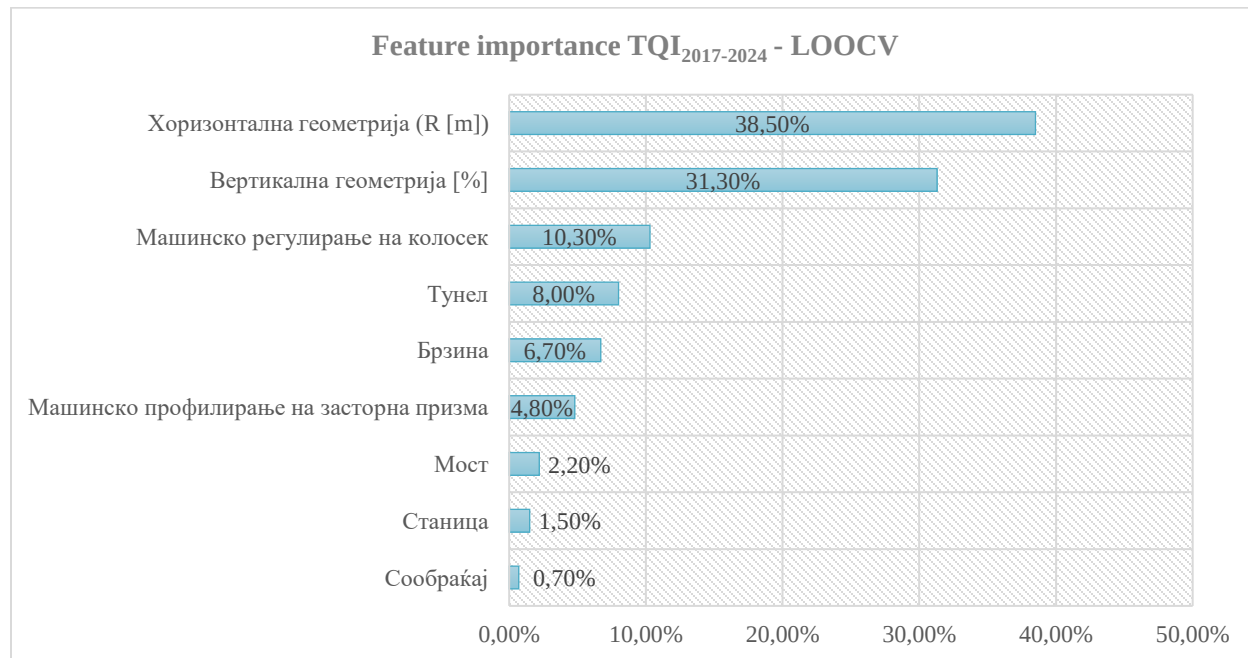


Слика 51. Визуелизација на важноста на променливите за моделот на TQI во 2022 година, добиена со Random Forest и LOOCV. (Извор: Сопствени пресметки)

7.1.5. Агрегирана проценка на значењето на променливите за TQI (2017–2024) со Random Forest

Анализата на агрегираното влијание на променливите врз индексот на квалитет на колосекот (TQI) за периодот 2017 – 2024 открива изразена доминација на геометриските параметри. Радиусот на закривеност на трасата, со просечно влијание од 38,5%, и надолжниот наклон со 31,3%, се највлијателни фактори во моделот за предвидување, што ја покажува силната зависност помеѓу геометриските карактеристики на трасата и долгорочната стабилност на колосекот. Ваквото влијание е особено изразено на делници со мали радиуси и стрмни надолжни наклони, карактеристики што често се среќаваат на трасата Колашин – Подгорица, каде значителен дел од делниците имаат радиуси под 600 метри и наклони блиски до максимално дозволените вредности (25%). Овие геометриски услови водат до зголемени динамички оптоварувања врз колосекот, што го забрзува процесот на деградација. Наспроти тоа, делниците со поголеми радиуси и поблаги наклони на нивелета овозможуваат порамномерно распоредување на силите и стабилно однесување

на системот, што резултира со подобри вредности на индексот на квалитет на колосекот TQI во подолг временски период.



Слика 52. Агрегирана важност на променливите врз индексот на квалитет на колосекот (TQI) за периодот 2017–2024, добиена со примена на LOOCV (Leave-One-Out Cross-Validation) и Random Forest модел. (Извор: сопствени пресметки)

Следната група релевантни параметри ја претставуваат променливите поврзани со активностите за машинско одржување, особено бројот на регулирања на колосекот и обликување на засторот. Агрегираната анализа покажува дека овие параметри имаат збирно влијание од приближно 16% во периодот 2017 – 2024, што ги позиционира веднаш зад геометриските варијабли според нивната важност во предвидувањето на индексот на квалитет на колосекот. Високата вредност на овие променливи произлегува од фактот што машинските интервенции најчесто се спроведуваат на делници со изразена геометриска нестабилност, каде што веќе е забележана деградација. Оттука, зачестеноста на регулирањата на колосекот и обликувањето на засторната призма се појавува како индиректен индикатор за критични зони со зголемен ризик, што го зголемува нивното значење во моделирањето на идната состојба на колосекот. Дополнително, со зголемувањето на бројот на интервенции во последните периоди (до 1.56 регулирања по делница во 2022 – 2024), нивниот ефект во моделот станува сè поизразен.

Од инфраструктурните параметри, присуството на тунел стабилно се издвојува како фактор со релативно високо влијание во сите години на анализа. Овој резултат е очекуван со оглед на специфичните услови на делниците во тунели, каде што се јавуваат ограничувања за пристап и маневар на машините за одржување, како и зголемена изложеност на конструкцијата на влага и кондензација. Дополнително, ограниченото изложување на директна сончева светлина и недоволната природна вентилација придонесуваат за задржување на влага во засторот, што го забрзува процесот на деградација. Во такви услови, геометриската стабилност на колосекот е потешко одржлива, што резултира со повисоки вредности на индексот на квалитет на колосекот TQI на делниците во тунели од трасата.

Наспроти останатите групи параметри, променливите поврзани со присуство на станици и мостови и вкупниот сообраќаен интензитет покажуваат маргинално влијание во агрегираниот модел за периодот 2017 – 2024. Ова се должи на нивната многу мала застапеност или константна вредност низ целата траса: станиците се застапени на 5,36% од делницата Колашин – Подгорица, мостовите на 3,53% од предметната делница, додека вредноста на бруто сообраќајот останува непроменета по должина на делницата. Ваквата ограничена дистрибуција ги исклучува овие параметри како релевантни фактори за објаснување на локалните разлики во индексот на квалитет на колосекот (TQI). Дополнително, нивниот ефект врз деградацијата на геометријата е претежно индиректен и обично се манифестира преку интеракција со други променливи, како геометријата на трасата и зачестеноста на интервенции за одржување, кои имаат поизразено директно влијание врз состојбата на колосекот.

7.2. Линеарна регресија

Како основен статистички модел, беше применета повеќекратната линеарна регресија за предвидување на индексот на квалитет на колосекот за 2024 година (TQI_{2024}), со цел да се постави основна референтна рамка за споредба со покомплексни модели, како и да се испита способноста на линеарната зависност за да ја опише деградацијата на колосекот врз основа на реално измерените параметри. Моделот е валидиран со 5-fold cross-validation, со што е обезбедена стабилност на резултатите.

Перформансите на линеарниот модел се сумирани преку четири статистички показатели прикажани во табела 30.

Табела 30. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на линеарната регресија при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)

Мерка	Вредност
R^2	0.57
MAE	4.68
RMSE	6.30
MSE	39.71

Вредноста на коефициентот на детерминација ($R^2 = 0.57$) потврдува дека моделот објаснува 57% од варијациите во индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}), што претставува умерена способност за опишување на зависностите помеѓу квалитетот на колосекот и разгледуваните параметри. Преостанатата необјаснета варијација од околу 43% произлегува од ефекти што не се целосно опфатени со линеарна спецификација, како нелинеарни врски, интеракции меѓу факторите или влијание на нерегистрирани параметри. Во инженерска смисла, овие резултати покажуваат дека моделот обезбедува сигурна ориентациона проценка, но не е доволен за фино предвидување кај делници со сложена деградациона динамика.

Средната апсолутна грешка ($MAE = 4.68$) претставува просечно апсолутно отстапување меѓу реалните и предвидените вредности на TQI, изразено во истите единици. Просечното отстапување од околу 4.7 TQI – поени може да резултира со погрешна категоризација на делница – на пример, сегмент со реална вредност $TQI = 19$ (добар квалитет) може да биде проценет како 23.7 (среден квалитет), или обратно. Таквите разлики имаат практично значење при донесување одлуки за одржување, особено кога е потребно прецизно разграничување на делници со стабилна, средна или критична состојба.

Коренот од средната квадратна грешка ($RMSE = 6.30$) е повисок од MAE , што потврдува присуство на поединечни случаи со поголеми отстапувања. Тоа најчесто се однесува на делници со повисоки вредности на TQI , кај кои геометријата е посложена и процесите на деградација не следат линеарна зависност. Пример за таков случај е делница со реална вредност $TQI = 35$ (лош квалитет), која може да биде проценета како 28.7 (среден квалитет), што директно влијае на приоритетот за интервенција. Иако овие случаи се релативно ретки, нивното влијание врз $RMSE$ е значајно, па овој показател претставува клучен критериум за стабилноста на моделот во критичните делови од трасата.

Вкупно земено, вредностите на MAE и $RMSE$ се прифатливи за инженерска примена. Просечната точност од приближно ± 5 TQI – поени обезбедува доволно сигурност за проценка на глобалните трендови на деградација и за планирање на превентивни активности. Сепак, за прецизна идентификација на критични делници и анализа на локални аномалии потребни се модели со поголема флексибилност и можност за пресликување на нелинеарни зависимости.

7.2.1. OLS анализа

Покрај овие основни показатели, со дополнителната OLS-анализа (Ordinary Least Squares – метода на обични најмали квадрати) добиени се и проширени статистички резултати кои го опишуваат квалитетот и стабилноста на линеарниот модел. Клучните параметри, прикажани се во табела 31.

Табела 31. Клучни статистички показатели од OLS моделот за линеарниот модел за предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)

Параметар	Вредност	Толкување
R²	0.571	Дел од варијацијата на TQI_{2024} објаснета од моделот
Adj. R²	0.563	Коригиран R^2 кој го зема предвид бројот на независни променливи
F-statistic	71.34	Мерка за општата значајност на моделот
Prob (F-statistic)	1.97×10^{-136}	Потврда за висока статистичка значајност ($p < 0.001$)
No. of observations	821	Вкупен број обсервации во анализата
DF Residuals	805	Степени на слобода на резидуалите
DF Model	15	Број на независни променливи во моделот
Durbin–Watson	1.10	Степен на автокорелација на резидуалите
AIC / BIC	5382 / 5458	Критериуми за споредба на модели

Како што е прикажано во табела 31, коригираниот коефициент на детерминација ($Adj. R^2 = 0.563$) го претставува делот од варијацијата на TQI_{2024} што се објаснува преку моделот, при што во пресметката се зема предвид бројот на независни променливи. Вредноста потврдува дека моделот задржува стабилност и доследност на резултатите дури и при поголем број влезни параметри.

Вредноста на F-статистиката = 71.34 ($p < 0.001$) ја претставува глобалната значајност на моделот и потврдува дека најмалку еден од параметрите има реално влијание врз TQI_{2024} . $Durbin–Watson = 1.10$ е статистички индикатор за проценка на автокорелација на резидуалите и означува дека грешките од предвидувањето се делумно зависни меѓу соседните делници. Оваа состојба карактеристична е за просторни податоци распределени по стациоณาжа, каде условите на колосекот се менуваат постепено и постои меѓусебна зависност меѓу последователните мерења.

Најзначајни варијабли во моделот се историските вредности на индексот на квалитет на колосекот, TQI₂₀₂₂ и TQI₂₀₁₉, со позитивни и високо значајни коефициенти. Тие го одразуваат континуитетот на процесот на деградација и стабилноста на геометриските трендови низ годините. Радиусот на кривината има негативен коефициент, што е во согласност со подобра геометрија кај поголеми радиуси.

Табела 32. Резултати од регресионите коефициенти и статистичката значајност на параметрите во линеарниот OLS модел (Извор: сопствени пресметки)

Параметар	Коефициент	Стандардна грешка	t	p	95% интервал на доверба
TQI ₂₀₁₇	0.0604	0.037	1.626	0.104	[-0.013, 0.133]
TQI ₂₀₁₉	0.1418	0.030	4.719	0.000	[0.083, 0.201]
TQI ₂₀₂₂	0.3566	0.032	11.067	0.000	[0.293, 0.420]
Брзина	0.0357	0.048	0.743	0.458	[-0.058, 0.130]
Тунел	1.8877	0.622	3.034	0.002	[0.666, 3.108]
Мост	0.9682	1.290	0.750	0.453	[-1.565, 3.501]
Станица	3.0268	1.171	2.584	0.010	[0.728, 5.326]
Радиус	-3.955e ⁻⁰⁶	6.69e ⁻⁰⁷	-5.912	0.000	[-5.27e ⁻⁰⁶ , -2.64e ⁻⁰⁶]
Сообраќај _{2014_2017}	1.31e ⁻⁰⁷	1.3e ⁻⁰⁷	1.006	0.315	[-1.25e ⁻⁰⁷ , 3.87e ⁻⁰⁷]
Старост на прагови	-0.0028	0.027	-0.104	0.918	[-0.055, 0.050]
Регулирање _{17_19}	-0.6114	0.494	-1.235	0.218	[-0.359, 1.583]
Регулирање _{19_22}	-0.4204	0.305	-1.377	0.169	[-1.019, 0.179]
Регулирање _{22_24}	-0.7761	0.419	-1.851	0.065	[-1.599, 0.048]
Профилирање _{17_19}	-0.3056	0.141	-2.217	0.029	[-0.583, -0.029]
Профилирање _{19_22}	-1.7037	0.612	-2.784	0.005	[-2.905, -0.503]
Профилирање _{22_24}	1.3423	0.318	4.219	0.000	[0.718, 1.967]

Категориските променливи за тунели и станици имаат позитивни коефициенти, што покажува дека на овие локации се јавува специфично однесување на геометријата – стабилност во тунели и повисок TQI во станици.

Бројот на активности на профилирање на засторот има различен ефект по периоди: во 2019–2022 негативен (намалување на TQI), а во 2022–2024 позитивен (зголемување на TQI), што се поврзува со фактот дека во последниот период интервенциите се изведувале на делници со веќе влошен квалитет.

Табела 33 прикажува компаративен преглед на сите независни променливи со нивните стандардирани коефициенти (Std β), нивоа на статистичка значајност и насока на влијание врз TQI₂₀₂₄. Параметрите TQI₂₀₂₂, TQI₂₀₁₉, тунел, профилирање на застор_{2022–2024} и радиус имаат највисоки вредности на стандардирани коефициенти и статистичка значајност ($p < 0.01$), што значи дека тие имаат најсилен придонес во варијацијата на излезната променлива.

Позитивните коефициенти (стрелка нагоре) означуваат дека зголемувањето на вредноста на променливата е поврзано со поголем индекс на деградација (повисок TQI), додека негативните (стрелка надолу) се поврзани со подобра геометрија и пониски вредности на TQI. Дел од параметрите, како вкупниот сообраќај, мостови и старост на прагови, немаат статистичка значајност во рамките на линеарната спецификација, што значи дека нивниот

ефект е посложен и веројатно се манифестира преку нелинеарни релации, кои ќе бидат анализирани во следните модели.

Табела 33. Вредности на стандардизирани коефициенти, статистичка значајност и насока на влијание на параметрите во линеарниот OLS модел (Извор: сопствени пресметки)

Параметар	β	SE(β)	t	p	CI 2.5%	CI 97.5%	Std β	Sig (0.05)	Dir
TQI ₂₀₂₂	0.3566	0.032	11.067	0.000	0.293	0.420	0.425	✓	↑
Радиус	-0.0000	0.000	-5.913	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.191	✓	↓
TQI ₂₀₁₉	0.1418	0.030	4.719	0.000	0.083	0.201	0.205	✓	↑
Профилирање ₂₂₋₂₄	1.3423	0.318	4.219	0.000	0.718	1.967	0.124	✓	↑
Тунел	1.8877	0.622	3.034	0.002	0.666	3.108	0.084	✓	↑
Профилирање ₁₉₋₂₂	-1.7037	0.612	-2.784	0.005	-2.905	-0.503	-0.079	✓	↓
Станица	3.0268	1.171	2.584	0.0099	0.728	5.326	0.071	✓	↑
Регулирање ₁₇₋₁₉	0.6114	0.494	1.235	0.218	-0.359	1.583	0.045	✗	↑
Регулирање ₁₉₋₂₂	-0.4204	0.305	-1.377	0.169	-1.019	0.179	-0.031	✗	↓
Регулирање ₂₂₋₂₄	-0.7761	0.419	-1.851	0.065	-1.599	0.048	-0.053	✗	↓
Сообраќај ₂₀₁₄₋₂₀₁₇	0.0000	0.000	1.006	0.314	0.000	0.000	0.000	✗	↑
Сообраќај ₂₀₁₇₋₂₀₁₉	0.0000	0.000	0.999	0.317	0.000	0.000	0.000	✗	↑
Вкупен сообраќај	0.0000	0.000	0.998	0.318	0.000	0.000	0.000	✗	↑
Мост	0.9682	1.290	0.750	0.453	-1.565	3.501	0.019	✗	↑
Брзина	0.0357	0.048	0.743	0.457	-0.058	0.130	-0.027	✗	↓
Сообраќај ₂₀₂₂₋₂₀₂₄	0.0000	0.000	1.001	0.317	0.000	0.000	0.000	✗	↑
Старост на прагови	-0.0027	0.0266	-0.103	0.917	-0.055	0.049	-0.004	✗	↓

7.2.2. Визуелна анализа на резултатите

Визуелната анализа претставува важен чекор во проценката на ефективноста на линеарната регресија, и овозможува директна споредба меѓу реалните и предвидените вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI₂₀₂₄). Дијаграмот на точки, хистограмот на дистрибуција и графикот на резидуали обезбедуваат посуштинско разбирање за точноста на моделот, потенцијалните систематски отстапувања и начинот на кој грешките се распределени. Визуелните интерпретации се особено значајни во инженерските анализи, каде што статистичките мерки понекогаш не се доволни за откривање на закономерности или аномалии – како што се групирани грешки, структурни девијации или крајни вредности.

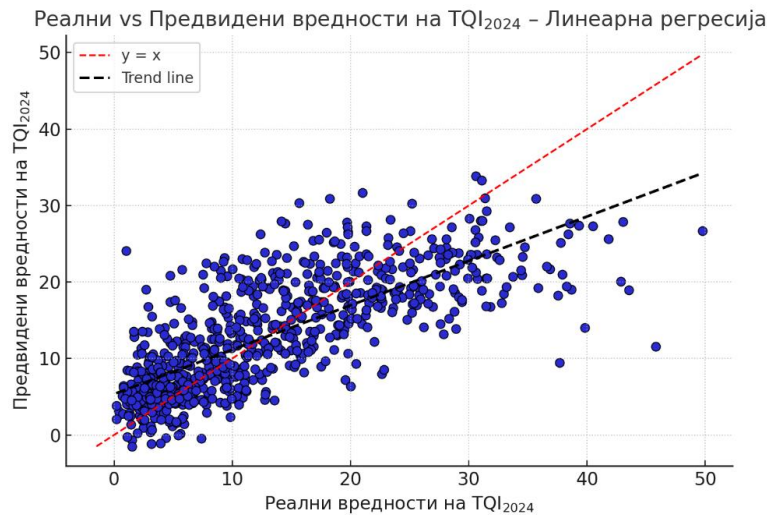
- Анализа на графичкиот приказ: реални vs предвидени вредности (Scatter дијаграм на точки)

На апцисата на слика 53 се прикажани реално измерените вредности на TQI₂₀₂₄, а на ординатата вредностите предвидени со линеарната регресија. Дијагоналната линија $y = x$ претставува идеално совпаѓање меѓу реалните и предвидените вредности. Секоја точка што лежи на оваа линија означува совршено предвидување.

Најголем дел од точките се концентрирани во долниот лев дел од графикот (TQI < 20), што значи дека моделот најпрецизно ги предвидува делниците со подобар квалитет на колосекот. Во овој интервал отстапувањата се минимални, а предвидените вредности се многу блиски до реалните. Линеарната регресија обезбедува стабилни и точни резултати кај делници со помала деградација и добро одржана геометрија.

Со зголемување на вредностите на TQI, растојанието на точките од дијагоналната линија постепено се зголемува. Моделот има потешкотии при предвидување на делници со поизразена геометријска нестабилност. Дел од точките се позиционирани повисоко или пониско од линијата $y = x$, што претставува знак за зголемена грешка во предвидувањето и

ограничена способност на моделот да ги опфати посложените релации кои го одредуваат однесувањето на колосекот. Најголемите отстапувања се присутни кај делници со $TQI > 30$, каде што точноста на моделот се намалува и резултатите стануваат помалку доверливи.



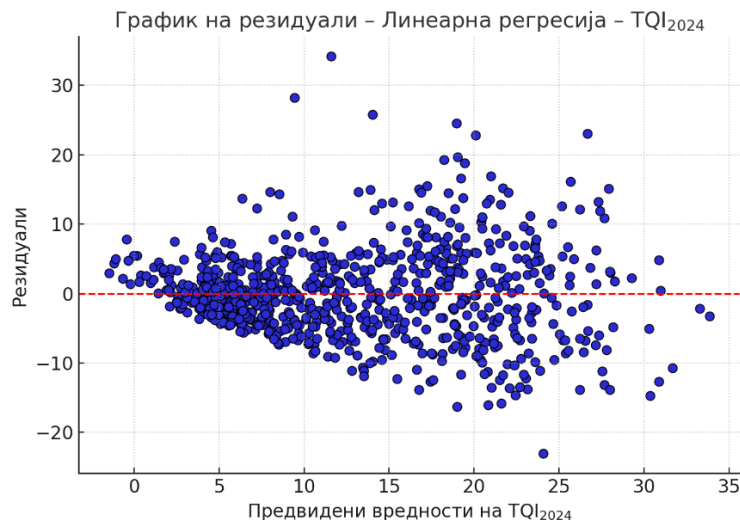
Слика 53. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со примена на линеарна регресија. (Извор: сопствени пресметки)

- **Анализа на графичкиот приказ: График на резидуали**

На слика 54 е прикажан распоредот на резидуалите за моделот на линеарна регресија, при што на вертикалната оска прикажани се разликите меѓу реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} . Овој график претставува важен индикатор за стабилноста и валидноста на моделот во различни интервали на предвидување. Анализата на резидуали овозможува да се утврди дали грешките се случајни или имаат одредена закономерност, што е суштинско за проверка на применливоста на линеарната структура. Кога резидуалите се рамномерно распределени околу нулта линија без изразен тренд, моделот се смета за стабилен и соодветно прилагоден на податоците. Наспроти тоа, појава на обрасци или зголемена дисперзија во одредени интервали значи дека линеарната форма не ја пресликува доволно прецизно реалната структура на податоците. Ваквите отстапувања најчесто се резултат на нелинеарни односи меѓу променливите или на недостиг на релевантни фактори во моделот. Затоа, овој тип визуелна анализа претставува неопходен чекор при проценка на доверливоста на моделот, особено кога се работи со инженерски податоци со изразена варијабилност.

Во интервалот на пониски предвидени вредности (TQI под 15), резидуалите се распоредени приближно симетрично околу нулта линија и имаат мала варијација. Оваа структура на грешки потврдува дека моделот дава стабилни и доверливи резултати кај делници со подобар квалитет на колосекот, каде што влијателните фактори се поизразени и полесно се пресликуваат со линеарна зависност.

Кога вредностите на TQI ја надминуваат границата од 20, се забележува зголемена варијабилност на резидуалите, со појава на значителни отстапувања и над и под нултата линија. Во овој интервал моделот ја губи стабилноста и не ги пресликува доволно добро посложените односи меѓу параметрите, особено кај делници со изразена геометриска деградација, каде што процесите не следат линеарен тренд.



Слика 54. График на резидуали за линеарниот регресиски модел за TQI_{2024} . (Извор: сопствени пресметки)

Распоредот на резидуалите потврдува дека линеарната регресија обезбедува задоволителни резултати при предвидување во пониските и средни интервали на TQI , но нејзината стабилност се намалува кај повисоки вредности. Токму во тие делници, каде што се јавува најизразена деградација и каде што е потребна прецизна проценка за приоритетна интервенција, овој модел има ограничен капацитет. Поради тоа, во вакви услови се препорачува примена на модели со поголема флексибилност и способност за опфаќање на посложени релации меѓу параметрите. Овие резултати ја потврдуваат потребата од премин кон методи со поголема пресметковна моќ, со цел пообјективно предвидување на деградацијата кај критичните делници од трасата.

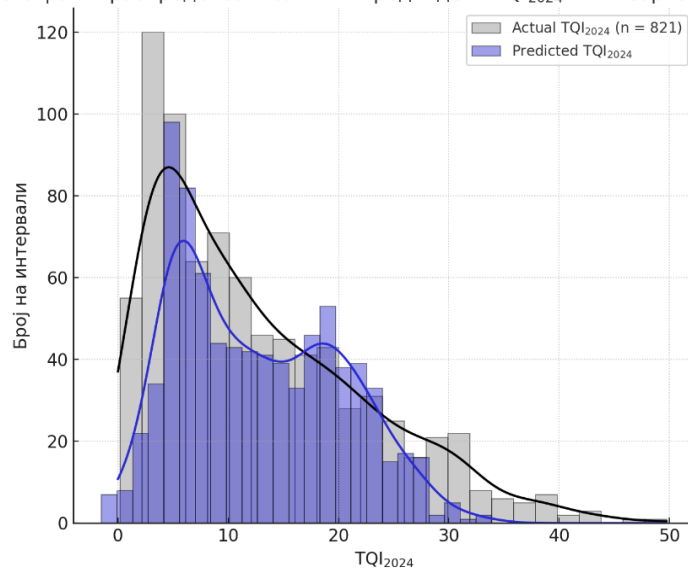
- **Анализа на графичкиот приказ: Хистограм**

Хистограмот на слика 55 прикажува споредба помеѓу реално измерените вредности на TQI_{2024} (сива боја) и вредностите предвидени со линеарната регресија (сина боја). Овој графички приказ овозможува оценка на тоа колку прецизно моделот ја следи распределбата на податоците, односно степенот на сличност помеѓу фреквенцијата на реалните и предвидените вредности во различни интервали на TQI . Со оваа визуелизација може да се разграничат интервалите каде што моделот ја репродуцира распределбата со висока точност од интервалите каде што се јавуваат поголеми отстапувања.

Во интервалот од 0 до 20 TQI се забележува добро совпаѓање меѓу реалните и предвидените вредности. Висината и обликот на сините столбови приближно ја следат распределбата на сивите, што значи дека моделот обезбедува стабилни резултати кај делници со умерена деградација и релативно стабилна геометрија. Во овој интервал, релациите меѓу променливите се повеќе предвидливи и подложни на линеарна зависност.

За делници со TQI над 25 се јавува јасна разлика помеѓу реалната и предвидената распределба: моделот пресметува помал број случаи со високи TQI вредности отколку што се присутни во податоците. Тоа значи дека линеарната регресија нема доволна прецизност за да ги опфати делниците со сериозна геометриска деградација. Како резултат на тоа, моделот не може соодветно да се користи при идентификација на критични делници.

Хистограм и распределба: Реални и Предвидени TQI₂₀₂₄ – Линеарна регресија



Слика 55. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI₂₀₂₄ добиени со линеарна регресија.
(Извор: сопствени пресметки)

Дополнително, во интервалот на TQI помеѓу 10 и 15 се појавуваат локални отстапувања во обликот и висината на столбовите. Иако глобалната форма на дистрибуцијата е слична, моделот не ја пресликува секогаш точно фреквенцијата, особено кај делници со средна состојба. Во овој дел од интервалот се губи дел од прецизноста, што го ограничува моделот при посигурна проценка на делници каде состојбата не е ниту стабилна ниту критична.

Поради овие отстапувања, особено кај средните и високите вредности на TQI, линеарната регресија покажува ограничена способност да ја репродуцира реалната распределба на податоците. Ова го намалува нејзиниот капацитет за сигурна идентификација на делници со нестабилна или влошена состојба, што е клучен предуслов при планирање на интервенции за одржување на колосекот.

7.2.3. Евалуација на резултатите од моделот

Резултатите потврдуваат дека линеарната регресија обезбедува прифатлива точност кај делници со стабилна геометрија, но има ограничена применливост кај критичните зони. Вредностите на R^2 и добиените статистички мерки потврдуваат дека моделот може да ја следи деградацијата на глобално ниво, но не обезбедува доволна прецизност за сигурна проценка на делници со сериозно влошување на геометријата.

Визуелните анализи (scatter - дијаграм на точки, график на резидуали и хистограм) го потврдуваат истиот тренд – стабилни предвидувања во долниот опсег на TQI и зголемена нестабилност кај делници со повисоки вредности, каде што моделот тешко ги репродуцира сложените релации меѓу параметрите.

Поради овие ограничувања, линеарниот модел може да се користи како референтна основа, но не е доволен за прецизна идентификација на критични зони со сериозна деградација. Резултатите ја нагласуваат потребата од примена на напредни модели со поголема флексибилност и способност да опфатат нелинеарни односи, кои ќе бидат обработени во наредните подточки.

7.3. Полиномна регресија

Како проширување на основниот статистички пристап со повеќекратна линеарна регресиона анализа, специфициран е регресионен модел со полиноминална зависност од втор степен за предвидување на индексот на квалитет на колосекот за 2024 година (TQI_{2024}). Целта беше да се подобри точноста при моделирање на зависноста меѓу влезните параметри и TQI , со воведување на полиномни членови кои овозможуваат опфаќање на нелинеарни трендови и посложени односи меѓу променливите. Ваквиот пристап претставува логичен напредок од линеарниот модел и овозможува пофлексибилна анализа на процесот на деградација на колосекот, особено кај делници со нестабилна геометрија или зголемена динамичка осетливост.

Следната табела ги прикажува вредностите на четирите основни статистички мерки за евалуација на перформансите на моделот.

Табела 34. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на полиномната регресија при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)

Мерка	Вредност
R^2	0.63
MAE	4.42
RMSE	5.85
MSE	34.21

Коефициентот на детерминација ($R^2 = 0.63$) потврдува дека моделот успева да објасни околу 63% од варијациите во податоците за TQI_{2024} . Ова претставува значително подобрување во однос на линеарната регресија ($R^2 = 0.57$) и покажува дека воведувањето на полиномни членови овозможува подобра репрезентација на зависностите меѓу параметрите. Моделот поуспешно ги опфаќа делниците каде што се јавуваат нелинеарни процеси на деградација и променливи ефекти од инфраструктурните и оперативните услови.

Средната апсолутна грешка ($MAE = 4.42$) покажува дека, во просек, предвидените вредности отстапуваат за околу 4.4 TQI – поени од реално измерените. Ова претставува подобрување во однос на линеарниот модел, каде што просечната грешка беше 4.68, што потврдува поголема усогласеност меѓу предвидените и реалните вредности. Прецизноста на моделот има директно инженерско значење: дури и мали грешки можат да влијаат врз категоризацијата на делниците, на пример, делница со реална вредност $TQI = 19$ (добар квалитет) може да биде предвидена како $TQI = 23.4$ (среден квалитет), што би довело до промена во приоритетот за одржување.

Коренот од средната квадратна грешка, односно стандардната девијација на грешките ($RMSE = 5.85$), ја претставува стандардната мерка за големина на отстапувањата и има особено значење при процена на стабилноста на моделот. Пониската вредност на $RMSE$ во споредба со линеарната регресија (6.30) значи дека полиномилниот модел подобро ги контролира поголемите грешки, иако тие сè уште се присутни. Во поединечни случаи, кај делници со високи TQI вредности, се забележуваат отстапувања со повисок интензитет. На пример, делница со реална вредност $TQI = 33$ може да биде предвидена како 26, што би резултирало со потценување на ризичниот статус и можен пропуст при приоритизација на интервенциите.

Разликата помеѓу MAE и $RMSE$ останува умерена, што значи дека екстремните грешки се поретки и имаат намалено влијание врз вкупната точност на моделот. Ова е важна

предност на полиномиалната регресија, бидејќи обезбедува поголема стабилност и пореална репрезентација на податоците во критичните интервали на деградација.

Резултатите од анализата потврдуваат дека полиномиалната регресија обезбедува методолошки понапреден и инженерски порелевантен пристап во споредба со линеарниот модел. Со способноста да ги опфати нелинеарните трендови и интеракции меѓу параметрите, моделот овозможува поголема точност при процена на состојбата на колосекот и попрецизна идентификација на делници со зголемен ризик. Ваквиот пристап е особено корисен при анализа на делници со изразена деградација, каде што линеарните модели ја губат прецизноста. Како резултат, полиномиалната регресија претставува соодветна алатка за подобро предвидување на TQI и основа за премин кон уште пофлексибилни техники од машинското учење во следните делови од анализата.

7.3.1. OLS анализа

Клучните параметри од OLS⁷-анализата за полиномниот модел прикажани се во табела 35.

Табела 35. Клучни статистички показатели од OLS моделот за полиномниот модел за предвидување на TQI₂₀₂₄ (Извор: сопствени пресметки)

Параметар	Вредност	Толкување
R²	0.631	Дел од варијацијата на TQI_2024 објаснета од моделот
Adj. R²	0.624	Коригиран R ² кој го зема предвид бројот на параметри
F-statistic	91.83	Мерка за општата значајност на моделот
Prob (F-statistic)	1.12×10^{-162}	Висока статистичка значајност ($p < 0.001$)
No. of observations	821	Вкупен број обсервации
DF Residuals	805	Степени на слобода на резидуалите
DF Model	15	Број на параметри во моделот
AIC / BIC	5258 / 5333	Критериуми за споредба на модели

Во однос на линеарниот регресионен модел, R² се зголемува од 0.571 на 0.631, а Adj.R² од 0.563 на 0.624. Истовремено, AIC/BIC се намалуваат (5382/5458 → 5258/5333). Ова значи дека додавањето на квадратни зависности (полином од втор ред) доведува до подобро прилагодување на моделот, без притоа значително да се зголеми неговата сложеност. F-статистиката = 91.83 ($p < 0.001$) потврдува дека моделот е глобално статистички значаен.

Вкупниот број на обсервации изнесува 821, со 15 независни променливи, додека критериумите AIC = 5258 и BIC = 5333 се пониски во споредба со линеарниот модел, што означува поповолна рамнотежа помеѓу точноста и комплексноста на спецификацијата.

Вредностите во Табела 36 ги прикажуваат најрелевантните параметри во полиномниот OLS модел, со нивните коефициенти, статистичка значајност и интервали на доверба. Историските вредности на индексот на квалитет (TQI₂₀₁₉ и TQI₂₀₂₂) имаат високи и статистички значајни позитивни коефициенти, што го одразува континуитетот на геометриските трендови и стабилното влијание на претходните состојби врз TQI₂₀₂₄.

Параметарот TQI₂₀₁₇ нема значајно влијание, што значи дека постарите мерења имаат ограничен ефект во подолг временски интервал, што е во согласност со инженерската логика за постепено губење на корелацијата со податоците од постари периоди. Променливата радиус (R) има негативен и статистички значаен коефициент ($\beta = -0.0064$),

⁷ OLS – Ordinary Least Squares

што ја одразува подобрата геометриска стабилност на делниците со поголеми радиуси на кривини.

Табела 36. Резултати од регресионите коефициенти и статистичката значајност на параметрите во полиномниот OLS модел (Извор: сопствени пресметки)

Параметар	Коефициент	Стандардна грешка	t	p	95% интервал на доверба
TQI ₂₀₁₇	0.0568	0.084	0.672	0.501	[-0.109, 0.222]
TQI ₂₀₁₉	0.4614	0.069	6.694	0.000	[0.326, 0.597]
TQI ₂₀₂₂	0.5721	0.088	6.533	0.000	[0.448, 0.696]
Радиус	-0.0064	0.001	-4.911	0.000	[-0.009, -0.004]
Регулирање ₁₉₋₂₂	3.2614	0.960	3.397	0.001	[1.374, 5.149]
Регулирање ₂₂₋₂₄	-4.5010	0.921	-4.889	0.000	[-6.308, -2.694]
Профилирање ₂₂₋₂₄	0.7878	1.666	-0.473	0.636	[-4.059, 2.482]
TQI ₂₀₁₉ ²	-0.0063	0.001	-5.224	0.000	[-0.009, -0.004]
TQI ₂₀₂₂ ²	-0.0060	0.002	-3.326	0.001	[-0.009, -0.002]
R ²	6.43×10 ⁻¹⁰	1.31×10 ⁻¹⁰	4.911	0.000	[3.86×10 ⁻¹⁰ , 9.01×10 ⁻¹⁰]
Регулирање ₁₉₋₂₂ ²	-1.197	0.236	-4.322	0.000	[-1.488, -0.556]

Регулирање во период 2019–2022 има позитивен и статистички значаен коефициент ($\beta > 0$), што е конзистентно со краткорочен ефект на подобрување по интервенција. Регулирање во период 2022–2024 е со негативен знак ($\beta < 0$), што е во согласност со појава на заситување – при чести интервенции ефектот не расте пропорционално.

Променливите поврзани со профилирање на засторот (2022–2024) и со регулирање (19–22)² имаат висока статистичка значајност и негативни квадратни коефициенти. Овие резултати ја опишуваат нелинеарната зависност меѓу бројот на активности и нивната ефикасност – со зголемување на бројот на интервенции, позитивниот ефект постепено се намалува, а прекумерните активности можат да доведат до намалена стабилност на засторот и долниот строј.

Квадратните термини за TQI₂₀₁₉² и TQI₂₀₂₂² имаат негативен знак и ја опишуваат тенденцијата на успорување на деградацијата – по одредено ниво на TQI, зголемувањето на вредностите не се одвива линеарно, туку се стабилизира. Позитивниот коефициент за варијаблата радиус на хоризонтална кривина R² (6.43×10⁻¹⁰) означува дека со зголемување на радиусот, стабилноста на геометријата се подобрува, но ефектот постепено се израмнува по достигнување на одредена граница, што ја опишува реалната појава на ограничен структурен придонес кај големи радиуси.

Вкупно земено, полиномиалниот модел обезбедува подобра прецизност од линеарната регресија и овозможува појасна интерпретација на нелинеарните ефекти. Вклучувањето на квадратни членови овозможува да се идентификуваат точките на стабилизација и границите на ефектот од интервенциите, што претставува суштинска предност при инженерска анализа на деградацијата на колосекот.

Резултатите прикажани во табела 37 ги претставуваат најзначајните параметри во полиномниот OLS модел и нивното влијание врз индексот на квалитет на колосекот (TQI₂₀₂₄). Историските вредности TQI₂₀₁₉ и TQI₂₀₂₂ имаат највисоки позитивни коефициенти, што ја прикажува јасната зависност на сегашниот квалитет од претходните состојби на геометријата. Овие променливи се основа за опишување на континуитетот на процесот на деградација и потврдуваат дека претходните мерења имаат суштинска предвидувачка моќ.

Табела 37. Вредности на стандардизирани коефициенти, статистичка значајност и насока на влијание на параметрите во полиномниот OLS модел (Извор: сопствени пресметки)

Параметар	β	SE(β)	t	p	CI 2.5%	CI 97.5%	Std β	Sig (0.05)	Dir
TQI ₂₀₁₉	0.4614	0.069	6.694	0.000	0.326	0.597	0.682	✓	↑
TQI ₂₀₂₂	0.5721	0.087	6.533	0.000	0.448	0.696	0.747	✓	↑
Радиус	-0.0064	0.001	-4.911	0.000	-0.009	-0.004	-3103.483	✓	↓
Регулирање ₁₉₋₂₂	3.2614	0.826	3.947	0.000	1.573	4.949	0.313	✓	↑
Регулирање ₂₂₋₂₄	-4.5100	0.921	-4.889	0.000	-6.308	-2.694	-0.307	✓	↓
Профилирање ₂₂₋₂₄	-1.2266	0.595	-2.061	0.039	-2.395	-0.148	-0.129	✓	↓
TQI ₂₀₁₉ ²	-0.0063	0.001	-5.224	0.000	-0.0087	-0.0039	-0.447	✓	↓
TQI ₂₀₂₂ ²	-0.0060	0.002	-3.326	0.000	-0.0101	-0.0025	-0.310	✓	↓
R ²	6.43×10 ⁻¹⁰	1.31×10 ⁻¹⁰	4.911	0.000	3.86×10 ⁻¹⁰	9.01×10 ⁻¹⁰	—	✓	↑
(Регулирање ₁₉₋₂₂) ²	-1.197	0.236	-4.322	0.000	-1.488	-0.556	-0.311	✓	↓

Променливата Радиус има негативен и статистички значаен коефициент, што е во согласност со подобра геометриска стабилност кај делници со поголеми радиуси на кривини. Ова е очекуван резултат бидејќи во таквите делници деформациите се помали и амплитудата на вертикалните отстапувања е ограничена.

Во однос на одржувањето, регулирањето на колосекот во периодот 2019–2022 има позитивен ефект врз TQI, што значи дека интервенциите во овој период довеле до подобрување на геометријата. Спротивно на тоа, регулирањето во период 2022–2024 има негативен знак, што ја покажува појавата на заситување на ефектот, односно повторените интервенции не носат пропорционално подобрување и може да влијаат на долниот строј поради прекумерно подбивање.

Параметарот профилирање на засторот (2022–2024) има негативен коефициент, што значи дека честите активности во овој период не секогаш резултираат со подобрување, туку понекогаш се поврзани со губење на компакноста на засторот и привремена нестабилност.

Негативните квадратни членови TQI₂₀₁₉² и TQI₂₀₂₂² ја претставуваат нелинеарната стабилизација на геометријата. Тоа значи дека, кога геометријата на колосекот е во полоша состојба (TQI е висок), темпото на понатамошно влошување се намалува, бидејќи делницата достигнува состојба на релативна стабилност каде дополнителните промени се помали. На тој начин, полиномиалниот модел ја претставува реалната инженерска појава дека деградацијата постепено се стабилизира.

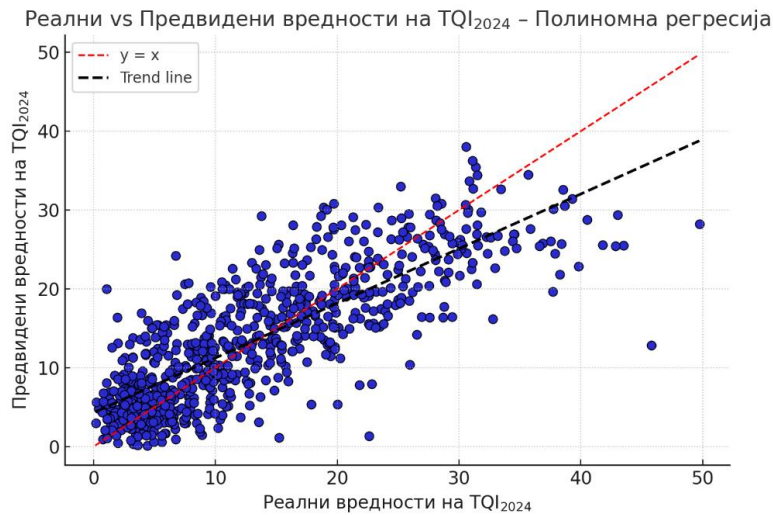
Позитивниот квадратен член за радиусот на хоризонтални кривини R² покажува дека зголемувањето на радиусот води до повисока стабилност, но по одредена граница ефектот се израмнува. Спротивно на тоа, негативниот квадратен член (Регулирање 2019–2022)² покажува намалување на придобивките при повторени интервенции, што ја потврдува потребата од оптимизација на фреквенцијата на одржување.

Во целина, полиномниот модел обезбедува поголема точност и појасна идентификација на нелинеарните ефекти во споредба со линеарниот, што го прави посоодветен за инженерска анализа на процесите на деградација кај железничкиот колосек.

7.3.2. Визуелна анализа на резултатите

- **Анализа на графичкиот приказ: реални vs предвидени вредности (Scatter дијаграм на дисперзија)**

На апцисата на слика 56 прикажани се реално измерените вредности на TQI_{2024} , додека на ординатата се прикажани вредностите добиени преку полиномиална регресија од втор степен.



Слика 56. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со примена на полиномна регресија. (Извор: сопствени пресметки)

Во долниот лев агол од графикот ($TQI < 20$) се забележува висока концентрација на точки, со мали отстапувања од линијата на совпаѓање. Ова потврдува дека моделот најпрецизно ги предвидува делниците со добар или умерен квалитет на колосекот, односно кај случаи со пониски вредности на TQI . Во овој интервал отстапувањата од линијата на идеално совпаѓање се мали, што потврдува дека полиномиалната регресија обезбедува посигурни резултати кај делници со пониски вредности на TQI .

Меѓутоа, при повисоки вредности на TQI , особено над 20, точките се пооддалечени од линијата на совпаѓање, што значи дека моделот предвидува со помала прецизност во овој интервал. Овој ефект станува особено изразен за вредности на TQI над 25, каде што се јавуваат значајни отстапувања. Причините за ваквите отстапувања може да произлегуваат од ограничената способност на моделот да објасни посложени, често нелинеарни релации кај делниците со напредната деградација, како и од влијанија на надворешни фактори кои не се вклучени во анализата.

Полиномната регресија покажува подобрена точност и поголема флексибилност во споредба со линеарната регресија, особено при предвидување на делници со посложени и променливи услови. Поради ова, моделот претставува соодветен избор за анализа и моделирање на долгорочни трендови во индексот на квалитет на колосекот (TQI).

- **Анализа на графичкиот приказ: График на резидуали**

На слика 57 прикажан е графикот на резидуали за полиномната регресија од втор степен.

Во интервалот на предвидени вредности до $TQI = 20$, резидуалите се распоредени приближно симетрично околу нултата линија, со умерена и конзистентна варијабилност. Распоредот на резидуалите потврдува стабилно однесување на моделот и доволно прецизни предвидувања за делници со добар или умерен квалитет на колосекот, односно во услови каде што геометриската деградација е помалку изразена.



Слика 57. График на резидуали за полиномен регресиски модел за TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)

Кај повисоките предвидени вредности ($TQI > 25$), резидуалите покажуваат поголема распрснатост, со изразени поединечни отстапувања од нултата линија. Иако не се забележува конзистентен шаблон, ваквите отстапувања покажуваат дека моделот има ограничена способност да ги преслика условите кај делниците со сериозна геометриска деградација. Ова може да се должи на присуство на посложени релации меѓу променливите или влијание на фактори што не се опфатени во структурата на моделот.

Отсуството на групирања или повторливи шеми кај резидуалите значи дека моделот не е пристрасен кон одреден интервал на вредности. Ова значи дека грешките се случајни и не зависат од вредноста на TQI која треба да се предвиди, што е важен индикатор за стабилноста на моделот. Таквата стабилност е критична за инженерска примена, бидејќи обезбедува сигурност дека резултатите се доверливи низ различни типови на делници и услови.

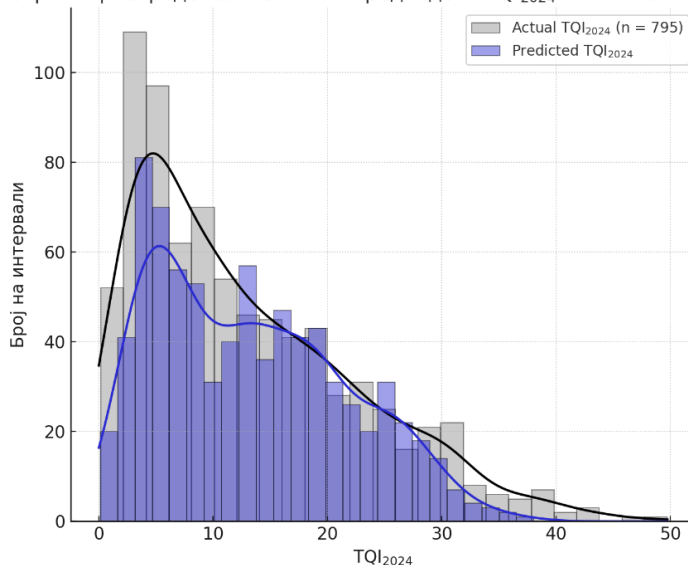
Анализата покажува дека полиномната регресија демонстрира подобри перформанси од линеарната регресија во однос на стабилноста и способноста за пресликување на нелинеарни односи, особено кај делниците со повисоки вредности на TQI . Ваквиот модел овозможува поефикасно претставување на сложените обрасци на деградација, што го прави соодветен избор за предвидување на долгорочни промени во геометријата на колосекот.

- **Анализа на графичкиот приказ: Хистограм**

Хистограмот на слика 58 прикажува споредбена анализа помеѓу реално измерените вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}), прикажани со сива боја, и вредностите добиени од полиномната регресија од втор степен, прикажани со сина боја.

Во интервалот на вредности за TQI од 0 до 20 се забележува добра усогласеност помеѓу предвидената и реалната дистрибуција. Формата и висината на сините столбови приближно ја следат распределбата на сивите столбови, кои ги прикажуваат реалните податоци, што потврдува дека моделот дава стабилни и веродостојни предвидувања за делници со стабилна геометрија и умерено ниво на деградација. Овој резултат е значаен при инженерска процена на делници со добар или среден квалитет, каде што се носат стандардни одлуки за тековно одржување.

Хистограм и распределба: Реални и Предвидени TQI₂₀₂₄ - Полиномна регресија



Слика 58. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI₂₀₂₄ добиени со полиномна регресија.
(Извор: сопствени пресметки)

Во интервалите каде што вредностите на TQI надминуваат 25, полиномната регресија покажува подобро совпаѓање со реалната дистрибуција во споредба со линеарниот модел. Иако се присутни одредени отстапувања, тие се помали и поретко изразени, што ја зголемува доверливоста на моделот при процена на делници со изразена геометриска деградација. Ваквата прецизност е особено значајна во инженерски контекст, каде што точната идентификација на критични делници претставува основа за ефикасно планирање на мерки за одржување.

Во интервалот на TQI од 10 до 15, моделот покажува стабилна усогласеност со реалната дистрибуција. Формата и висината на сините столбови приближно ја следат фреквенцијата на реалните вредности (сиви столбови), што овозможува сигурна идентификација на делници со просечен квалитет на колосекот. Ваквата прецизност е особено важна при дефинирање на гранични вредности за интервенција и планирање на одржувањето.

7.3.3. Евалуација на резултатите од моделот

Резултатите потврдуваат дека регресионата анализа за специфициран модел со полином од втор степен обезбедува поголема точност и подобра флексибилност во споредба со линеарниот модел, особено при моделирање на сложени релации меѓу параметрите што влијаат врз индексот на квалитет на колосекот (TQI₂₀₂₄). Вредноста на $R^2 = 0.63$ значи дека моделот опфаќа поголем дел од варијациите во податоците и обезбедува попрецизна процена на состојбата на колосекот. Иако подобрувањето е умерено, моделот покажува повисока стабилност при предвидување на делници со умерена и изразена деградација.

Визуелните анализи (scatter - дијаграм од точки, график на резидуали и хистограм) прикажуваат зголемена усогласеност помеѓу реалните и предвидените вредности. Распределбата на точките е поблиску до дијагоналата на совпаѓање, резидуалите се рамномерно распоредени околу нултата линија без забележлива структура, а хистограмот покажува добра сличност во обликот и висината на столбовите. Овие резултати потврдуваат

дека моделот има подобра способност да ги пресликува нелинеарните трендови во податоците и да задржи стабилност во поширок опсег на вредности.

Поради овие карактеристики, полиномната регресија претставува соодветен пристап за анализа на општите трендови на промена на квалитетот на колосекот, но не обезбедува доволна прецизност за сигурна идентификација на делници со највисоко ниво на деградација. Моделот може да се користи како понапредна референтна рамка во однос на линеарниот, додека за подетално моделирање на сложените процеси на деградација се потребни методи со поголема пресметковна моќ и способност за обработка на нелинеарни односи, кои ќе бидат разгледани во наредните подточки.

7.4. Ridge регресија

Како варијанта на класичната линеарна регресија со вграден механизам за контрола на мултиколинеарност, Ridge⁸ регресијата беше применета за предвидување на индексот на квалитет на колосекот за 2024 година (TQI₂₀₂₄). Овој модел претставува стандардизирана форма на линеарна регресија, во која преку регуларизациски параметар (λ) се ограничува големината на регресиските коефициенти. На тој начин се намалува преголемата чувствителност на моделот кон варијации во податоците и се обезбедува поголема стабилност при работа со корелирани влезни променливи.

Табела 38 ги прикажува вредностите на четирите основни статистички мерки за евалуација на перформансите на моделот. Коефициентот на детерминација ($R^2 = 0.57$) покажува дека моделот објаснува околу 57% од варијациите во TQI₂₀₂₄, што е во рамки со вредноста добиена од класичната линеарна регресија. Иако точноста останува приближно иста, стабилноста на моделот е подобрена поради регуларизацискиот механизам, кој ја ограничува преголемата зависност меѓу параметрите. Со ова се постигнува порамномерна распределба на влијанијата и се избегнува појава на нереално високи коефициенти, што е особено важно при работа со високо корелирани инженерски податоци.

Табела 38. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на Ridge регресија при предвидување на TQI₂₀₂₄ (Извор: сопствени пресметки)

Мерка	Вредност
R²	0.57
MAE	4.68
RMSE	6.30
MSE	39.68

Средната апсолутна грешка (MAE = 4.68) ја претставува просечната апсолутна разлика меѓу предвидените и реалните вредности на индексот на квалитет на колосекот. Вредноста од 4.68 значи дека, во просек, секое предвидување отстапува за околу ± 4.7 TQI – поени од реалната вредност. Ова отстапување е прифатливо за инженерска примена и овозможува доверлива проценка на општата состојба на колосекот. Сепак, кај делници кои се блиску до граничните вредности за интервенција, ваквата грешка може да влијае на точноста на приоритетизацијата, па затоа потребна е претпазливост при анализа на критичните зони.

⁸ Ridge регресијата позната како и Тихонова регуларизација (именувана по Андреј Тихонов) е метод за проценка на коефициентите на моделите со повеќекратна регресија во сценарија каде што независните променливи се високо корелирани.

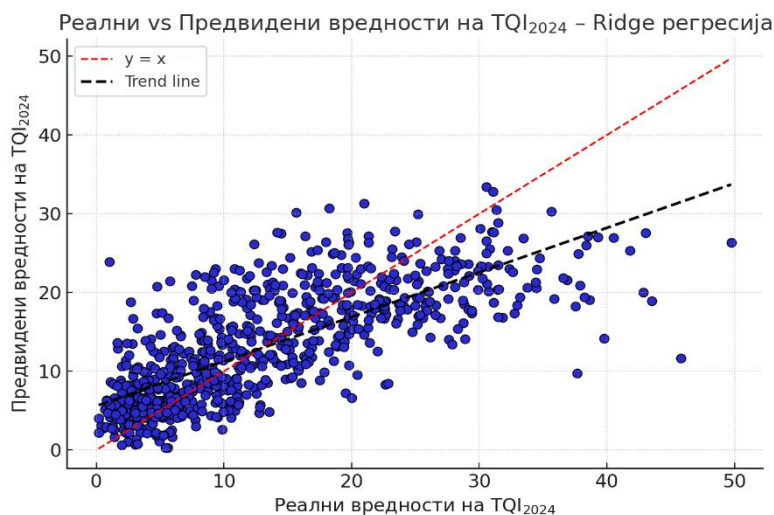
Коренот од средната квадратна грешка ($RMSE = 6.30$) претставува карактеристична големина на грешките во моделот и е чувствителен на поединечни големи отстапувања. Поради квадрирањето на грешките при пресметката, повисоките отстапувања имаат значително поголема тежина во крајниот резултат. Вредноста од 6.30 укажува дека просечната грешка, земајќи ги предвид и екстремните случаи, изнесува околу ± 6.3 TQI – поени. Во инженерски контекст, ова значи дека моделот може да направи поголеми отстапувања кај делници со високи TQI вредности, што е особено релевантно при идентификација на сегменти со ризична состојба на колосекот.

Ridge регресијата овозможува стабилна и робусна процена на зависностите меѓу параметрите и е особено корисна во ситуации каде што влезните променливи се делумно зависни или кога постои ограничен број на мерења. Иако не донесува значително подобрување во точноста споредено со класичната линеарна регресија, нејзината предност се состои во зголемената отпорност на варијации и стабилност на резултатите. Сличноста на перформансите меѓу Ridge и линеарната регресија укажува на постоење на конзистентна структура на податоците и добро дефинирани односи меѓу параметрите, што ја потврдува доверливоста на добиените резултати.

7.4.1. Визуелна анализа на резултатите

- **Анализа на графичкиот приказ: реални vs предвидени вредности (Scatter дијаграм)**

На слика 59 е прикажана споредбата помеѓу реално измерените вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}) прикажани на хоризонталната оска, и вредностите предвидени со Ridge регресија, прикажани на вертикалната оска.



Слика 59. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со примена на Ridge регресија. (Извор: сопствени пресметки)

Врз основа на визуелниот распоред на точките, може да се заклучи дека моделот покажува умерена усогласеност со реалните вредности, особено во интервалот од $TQI = 10$ до $TQI = 25$. Во овој интервал, предвидените вредности се релативно стабилни и блиски до идеалната линија на совпаѓање, со што моделот постигнува солидна прецизност кај делниците со среден квалитет. Перформансите се слични на оние добиени со линеарната регресија, но Ridge регресијата обезбедува поголема стабилност на параметрите, што е особено важно при моделирање на комплексни инфраструктурни услови.

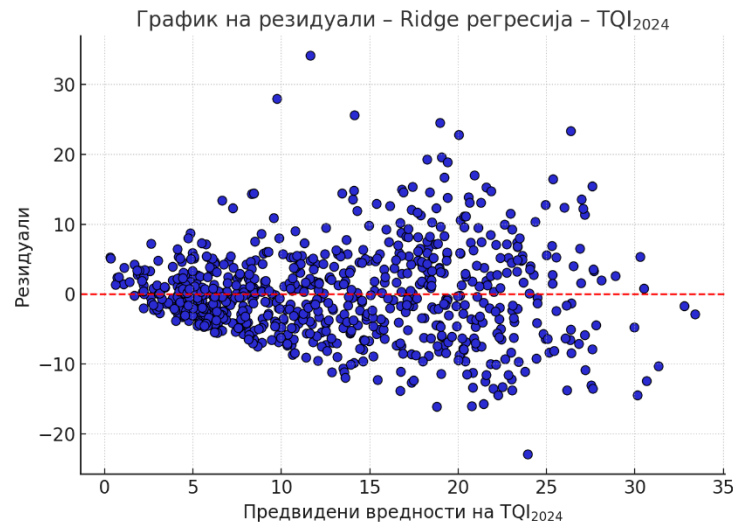
Кај повисоките вредности на TQI, особено над 30, голем дел од точките се групираат под идеалната линија, што значи дека моделот често предвидува пониски вредности отколку што се реалните, особено за делници со изразена деградација. Ова води до отстапувања слични на оние кај линеарната регресија и може да резултира со намалена способност за навремено откривање на делници со сериозна геометриска деградација.

Во горниот дел од дијаграмот се забележува дека повеќе точки се насобрани околу вредности од 15 до 20 на вертикалната оска, без оглед на реалните вредности на хоризонталната. Ова значи дека моделот често дава слични предвидувања за делници со различен реален TQI, што ја ограничува неговата способност да ги разликува посериозно деградираните делници. Ваквиот ефект се јавува како последица на регуларизацијата, која ги стеснува границите на излезните вредности со цел да се намалат екстремните варијации.

Иако Ridge регресијата обезбедува поголема стабилност во однос на варијациите на параметрите, сè уште се јавуваат значајни отстапувања кај делниците со повисоки вредности на TQI. Во овие случаи, моделот има тенденција да ги приближува предвидувањата кон средниот интервал на вредности, наместо да ги следи реалните екстреми. Тоа го ограничува неговиот капацитет за прецизна идентификација на делници со сериозна геометриска деградација. Од таа причина, Ridge регресијата е подобро прилагодена за анализа на општата динамика на квалитетот на колосекот, отколку за лоцирање на критични точки.

- **Анализа на графичкиот приказ: График на резидуали**

На слика 60 е прикажан графикот на резидуали за Ridge регресиониот модел. Во интервалот на предвидени вредности до $TQI = 20$, резидуалите се распоредени рамномерно околу нултата линија и имаат мала варијација, што значи дека моделот функционира стабилно кај делници со добар или умерен квалитет на геометријата на колосекот.



Слика 60. График на резидуали за Ridge регресионски модел за TQI_{2024} . (Извор: сопствени пресметки)

Кај вредности на TQI над 25, се забележува зголемена дисперзија на резидуалите и појава на поединечни значајни отстапувања. Иако сличен образец се јавува и кај другите модели, кај Ridge регресијата ваквите отстапувања се поизразени. Во овој интервал, моделот има намалена точност при предвидување, особено за делници со сериозна деградација.

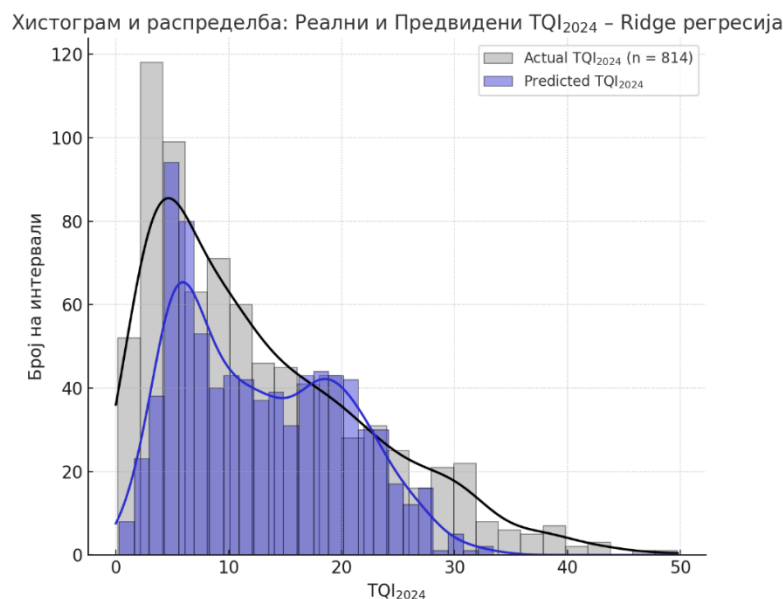
Распоредот на резидуалите не покажува закривеност или изразен тренд, што значи дека нема знаци на структурна несоодветност на моделот. Дополнително, нема јасни и

едностранни отстапувања во одредени интервали, што укажува на рамномерна прецизност низ целиот интервал на предвидени вредности.

Распоредот на резидуалите покажува дека Ridge регресијата обезбедува стабилни резултати со умерени отстапувања, што ја прави соодветна за анализа на инфраструктурни податоци каде што постои висока корелација меѓу променливите. Сепак, при процена на делници со високи вредности на TQI, моделот има ограничена способност да ги отслика сложените карактеристики на деградацијата. Затоа, Ridge е најпогоден за сценарија каде што е приоритет стабилноста на параметрите, а не максималната точност на предвидувањата.

- **Анализа на графичкиот приказ: Хистограм**

Хистограмот на слика 61 ја споредува реалната дистрибуција на вредностите на TQI_{2024} (сива боја) со предвидените вредности од Ridge регресиониот модел (сина боја). Преку оваа визуелизација се добива јасна слика за способноста на моделот да ја преслика формата и распоредот на податоците.



Слика 61. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со Ridge регресија. (Извор: сопствени пресметки)

Во интервалот на вредности на TQI од 10 до 25, предвидените вредности се приближно усогласени со реалната распределба. Во овој интервал, моделот обезбедува стабилни резултати и задржува висока прецизност при предвидување на делници со умерен степен на деградација. Кај вредности на TQI поголеми од 30, моделот систематски предвидува пониски вредности од реалните. Поради тоа, најдеградираните делници не се идентификуваат со доволна точност, што претставува сериозно ограничување при планирање на интервенции.

Предвидената дистрибуција има изразено рамномерен облик, без екстремни скокови или крајни вредности, како резултат на ефектот на регуларизацијата. Ваквата стабилност на излезните вредности го ограничува капацитетот на моделот да ги препознае екстремните случаи, особено кај делници со сериозна деградација.

7.4.2. Евалуација на резултатите од моделот

Резултатите потврдуваат дека Ridge регресијата претставува стабилна варијанта на класичната линеарна регресија, особено при присуство на мултиколинеарност меѓу

влезните променливи. Преку регуларизацискиот λ -параметар се контролира големината на регресионите коефициенти и се намалува ризикот од преобучување (overfitting), што обезбедува подобра стабилност на моделот при работа со високо-димензионални и корелирани инженерски податоци. Вредноста на $R^2 = 0.57$ покажува дека моделот објаснува околу 57% од варијациите во TQI_{2024} , со прецизност слична на линеарната регресија, но со подобра отпорност на варијации во податоците.

Визуелните анализи (scatter дијаграм, график на резидуали и хистограм) потврдуваат дека Ridge регресијата има стабилни предвидувања кај делници со ниски и средни вредности на TQI . Распоредот на точките во дијаграмот е компактен во долниот опсег, резидуалите се рамномерни без изразен тренд, а хистограмот ја задржува основната форма на дистрибуцијата на реалните вредности. Сепак, при вредности на TQI поголеми од 30, моделот има тенденција да предвидува пониски вредности од реалните, што доведува до потценување на состојбата кај делници со сериозна деградација.

Ridge регресијата обезбедува добра рамнотежа помеѓу точност и стабилност, што ја прави соодветна за анализа на глобалните трендови и за сценарија каде што стабилноста на параметрите има приоритет пред максималната прецизност. Сепак, поради ограничената способност да ги идентификува критичните делници со висока деградација, моделот не може да се користи како самостоен инструмент за инженерска процена. Во такви случаи, препорачлива е примена на модели со поголема флексибилност и способност за моделирање на нелинеарни релации, како што се Random Forest и SVR, кои овозможуваат подетална анализа и повисока предвидувачка сигурност.

7.5. Random Forest модел

Како напредна техника од областа на машинското учење, Random Forest⁹ регресијата беше применета за предвидување на индексот на квалитет на колосекот за 2024 година (TQI_{2024}). Овој модел е особено погоден за инженерски анализи каде што зависностите меѓу влезните параметри и процесот на деградација се нелинеарни, а податоците содржат висока варијабилност и стохастички шум. Random Forest автоматски ги селектира највлијателните променливи, покажува висока толеранција на мултиколинеарност и овозможува флексибилно моделирање без потреба од претходна нормализација или трансформација на податоците.

Во Табела 39 прикажани се вредностите на четирите основни статистички мерки за евалуација на перформансите на моделот.

Табела 39. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на Random Forest при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)

Мерка	Вредност
R^2	0.69
MAE	3.96
RMSE	5.35
MSE	28.64

Вредноста на коефициентот на детерминација ($R^2 = 0.69$) означува дека моделот објаснува околу 69% од варијациите во податоците за TQI_{2024} , што претставува највисоко ниво на точност меѓу сите статистички модели разгледани досега. Високата вредност на R^2

⁹ Random Forest Regression е метода на машинско учење која комбинира предвидувања од бројни т.н. индивидуални дрвја на одлучување за да произведе попрецизно и постабилно конечно предвидување.

ја демонстрира способноста на Random Forest да ја преслика комплексната и нелинеарна природа на деградацијата на колосекот, при што ефектите од геометријата, инфраструктурата, експлоатацијата и одржувањето се интегрираат во стабилен модел.

Средната апсолутна грешка ($MAE = 3.96$) изнесува приближно ± 4 TQI – поени, што претставува најниска вредност меѓу применетите модели. Ова значи дека, во просек, отстапувањата меѓу предвидените и реалните вредности се мали и рамномерно распределени. Така дефинираната точност е повеќе од доволна за инженерска примена, особено во услови каде што е потребна навремена идентификација на делници со зголемена нестабилност. Сепак, кај делници што се блиску до граничните вредности за интервенција, дури и минимални разлики можат да влијаат врз давање на приоритет на мерките, поради што се препорачува внимателна интерпретација на резултатите во овие зони.

Коренот од средната квадратна грешка ($RMSE = 5.35$) претставува типична големина на грешките во предвидувањето и, во споредба со останатите модели, покажува подобра контрола на екстремните отстапувања. Имајќи предвид дека $RMSE$ е чувствителен на поголеми грешки, вредноста од 5.35 покажува дека дури и кај делници со повисоки TQI вредности моделот го задржува нивото на стабилност и не создава пренагласени отстапувања. Ова е особено важно при инженерски анализи на критични делници, каде што се бара висока доверливост во предвидувањата. Во практична смисла, Random Forest не само што обезбедува стабилни резултати во најголемиот дел од интервалите, туку и ефикасно ги контролира поголемите грешки, што го прави применлив за реални инфраструктурни услови.

Разликата меѓу $RMSE$ и MAE останува умерена, односно екстремните грешки се присутни во ограничен број случаи и не влијаат значајно врз целокупната точност. Оваа стабилност е резултат на карактеристичниот збиен пристап на моделот, кој комбинира повеќе поединечни дрва на одлуки и ги усреднува нивните предвидувања, со што се намалува варијацијата и се зголемува робустноста на резултатите.

Random Forest моделот претставува најсоодветен избор за предвидување на TQI_{2024} во рамки на оваа анализа, бидејќи нуди најдобра комбинација на точност, стабилност и интерпретабилност. Со својата способност да ги интегрира ефектите од повеќе типови параметри и да ги опфати нивните меѓузависности, моделот овозможува сигурна проценка на состојбата на колосекот и ефективна поддршка при инженерско донесување одлуки. Високата предвидувачка моќ, комбинирана со отпорност на стохастички влијанија, го потврдува Random Forest како технички најоправдан модел во рамките на изведените експериментални анализи.

7.5.1. Визуелна анализа на резултатите

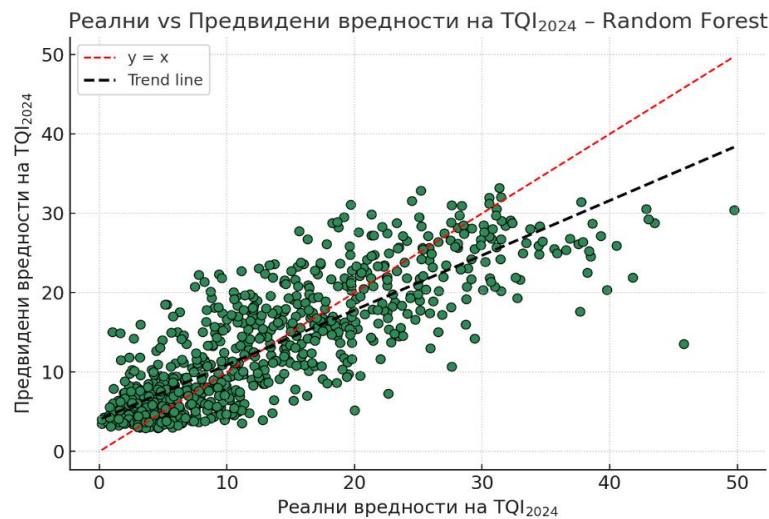
- **Анализа на графичкиот приказ: реални vs предвидени вредности (Scatter дијаграм)**

На слика 62 прикажана е споредба помеѓу реалните вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}) и вредностите предвидени со моделот Random Forest.

Голем дел од точките се распоредени блиску до линијата $y = x$, особено во интервалот од $TQI = 5$ до $TQI = 25$. Во овој интервал, моделот предвидува вредности со мала грешка, што го прави ефикасен при процена на делници со низок или умерен степен на деградација.

Random Forest не покажува тенденција кон предвидување на пониски вредности од реалните кај делници со високи TQI ($TQI > 30$), што е чест недостаток кај другите модели. Моделот ја задржува прецизноста и во интервали со изразена геометриска деградација, што

овозможува сигурна идентификација на критични делници. Поради ова, Random Forest е особено применлив во инженерски анализи каде што е потребно навремено и точно откривање на делници што бараат интервенција.

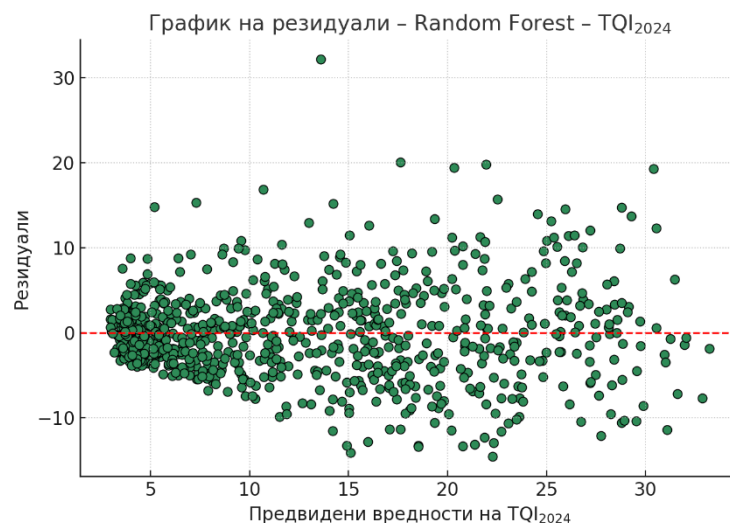


Слика 62. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI₂₀₂₄ добиени со примена на Random Forest. (Извор: сопствени пресметки)

Присуството на поединечни отстапувања очекувано е при работа со реални податоци, но во случајот на Random Forest тие се релативно изолирани и немаат значајно влијание врз глобалната точност.

- **Анализа на графичкиот приказ: График на резидуали**

На слика 63 е прикажан графикот на резидуали за Random Forest моделот, кој овозможува проценка на квалитетот на предвидувањата преку визуелизација на отстапувањата помеѓу реалните и пресметаните вредности на TQI₂₀₂₄.



Слика 63. График на резидуали за Random Forest регресиски модел за TQI₂₀₂₄. (Извор: сопствени пресметки)

Кај предвидени вредности на TQI до 20, резидуалите се распоредени приближно симетрично околу нултата линија, со умерена варијабилност. Тоа е показател за стабилна и

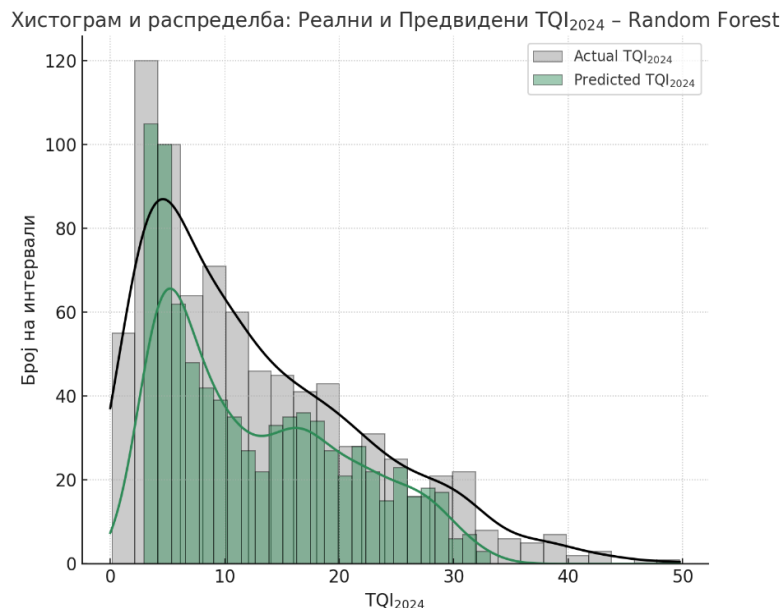
конзистентна способност за предвидување на моделот во интервалите што одговараат на делници со добар или умерен геометриски квалитет.

Во интервалот каде $TQI > 25$, резидуалите се подисперзирани и имаат поширок распон. Во овој интервал, моделот покажува поголеми отстапувања во споредба со интервалите со умерени TQI вредности, и најчесто произлегуваат од посложени геометриски и инфраструктурни услови кај делници со висока деградација.

Во графикот на резидуали не се забележува појава на тренд или шема, резидуалите не се групираат на едната страна од нултата линија, ниту се зголемува нивната варијабилност со раст на предвидените вредности. Ова значи дека моделот не прави систематски грешки во одредени интервали и ја задржува стабилноста на предвидувањата низ целиот интервал на вредности за индексот на квалитет на колосекот TQI .

- Анализа на графичкиот приказ: Хистограм

Хистограмот на слика 64 обезбедува споредбена анализа помеѓу реалната распределба на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}) и вредностите добиени од Random Forest моделот.



Слика 64. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со Random Forest. (Извор: сопствени пресметки)

Во интервалот на вредности за TQI од 0 до 20, предвидената распределба приближно ја следи реалната, што значи дека моделот точно ги реплицира вредностите кај делници со стабилна состојба.

Во интервалот $TQI > 25$, Random Forest покажува поголема усогласеност со реалната распределба во споредба со статистичките модели, особено при обработка на делници со изразена геометриска нестабилност. Таквата прецизност го подобрува капацитетот за рано откривање на критични делници од трасата кои бараат итни интервенции.

Иако моделот во целина ја репродуцира распределбата на податоците, во интервалот од $TQI = 10$ до $TQI = 15$ се присутни мали локални отстапувања. Овие отстапувања немаат значително влијание врз глобалната прецизност, но отвораат простор за понатамошно подобрување на моделот, на пример преку комбинирање со други методи.

7.5.2. Евалуација на резултатите од моделот

Резултатите од примената на Random Forest моделот прикажуваат највисоко ниво на точност и стабилност во споредба со сите претходно анализирани регресиони модели. Коефициентот на детерминација ($R^2 = 0.69$) означува дека моделот опфаќа околу 69% од варијациите на TQI_{2024} врз основа на влезните параметри, што претставува најдобар резултат во рамките на спроведените анализи. Вредностите на средната апсолутна грешка ($MAE = 3.96$) и коренот од средната квадратна грешка ($RMSE = 5.35$) се ниски, со што се потврдува дека отстапувањата меѓу предвидените и реалните вредности се минимални. Моделот обезбедува стабилни проценки и при делници со посложена геометриска состојба и поголема деградација.

Визуелните анализи (scatter дијаграм, график на резидуали и хистограм) ја одразуваат истата стабилност и конзистентност. Точките во scatter дијаграмот се групирани околу дијагоналната линија $y = x$, што означува блискост меѓу реалните и предвидените вредности. Резидуалите се рамномерно распределени околу нултата линија без изразен тренд, што ја потврдува рамномерноста на грешките низ целиот интервал на TQI . Формата на хистограмот на предвидените вредности е речиси идентична со распределбата на реалните податоци, при што дистрибуцијата останува доследна и во граничните интервали со високи вредности на TQI .

Random Forest се издвојува како најстабилен и најпрактичен модел во рамките на анализираните пристапи. Благодарение на способноста да обработува сложени и нелинеарни релации без потреба од претходна нормализација на податоците, моделот обезбедува високо ниво на точност и сигурност на предвидувањата. Овој пристап е особено применлив за инженерски анализи на делници со варијабилна состојба на колосекот, каде што е потребна сигурна идентификација на критични зони и поддршка при донесување одлуки за планирање на интервенции за одржување.

7.6. Невронска мрежа на MLP

Како напредна техника од областа на машинското учење, невронските мрежи (Multilayer Perceptron – MLP) беа применети за предвидување на индексот на квалитет на колосекот за 2024 година (TQI_{2024}). Овој модел е особено погоден за инженерски анализи во кои постојат сложени, нелинеарни и тешко забележливи односи меѓу параметрите, а истовремено е потребна можност моделот да се адаптира преку итеративно учење од податоците.

Следната табела ги прикажува вредностите на четирите основни статистички мерки за евалуација на перформансите на моделот.

Табела 40. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на Neural Network MLP Regression при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)

Мерка	Вредност
R^2	0.63
MAE	4.39
RMSE	5.88
MSE	34.52

Коефициентот на детерминација ($R^2 = 0.63$) покажува дека околу 63% од варијациите во TQI_{2024} се објаснети преку MLP моделот. Ова ниво на точност ја позиционира невронската мрежа како втор модел по перформанси, веднаш по Random Forest. Ваквиот

резултат потврдува дека MLP успешно се приспособува на сложените и нелинеарни шеми во податоците, вклучувајќи и односи кои класичните регресиски техники тешко можат да ги идентификуваат или адекватно да ги моделираат.

Средната апсолутна грешка ($MAE = 4.39$) и коренот од средната квадратна грешка ($RMSE = 5.88$) се пониски од вредностите добиени со линеарната и Ridge регресијата, а слични на резултатите од полиномиалниот модел. Ова значи дека MLP постигнува стабилна точност во пошироки интервали од податоците, особено кај делници со умерена состојба на колосекот. Разликата помеѓу $RMSE$ и MAE е умерена, што значи дека поголемите отстапувања се присутни само во мал број случаи, при што моделот задржува стабилност и добро ја контролира појавата на екстремни грешки.

Во инженерска смисла, просечното отстапување од околу ± 4.4 TQI – поени претставува прифатливо ниво на грешка за општа проценка на состојбата на колосекот. Имајќи предвид дека вредностите на TQI на анализираната делница се движат од околу 5 до над 35, ваквото отстапување овозможува сигурна проценка на глобалните трендови и навремено идентификување на делници со потенцијална деградација. Сепак, кај делници блиску до прагот за техничка интервенција, ваквите грешки можат да влијаат врз точноста на инженерските одлуки, поради што моделот треба да се користи со дополнителна внимателност при анализата на критичните зони.

Вредноста на $RMSE = 5.88$ ја претставува типичната големина на грешката, земајќи ги предвид и случаите со поголеми отстапувања. Ова значи дека, иако MLP генерално обезбедува стабилни предвидувања, кај делници со изразена геометриска деградација понекогаш може да се јават поголеми грешки. Сепак, моделот ја задржува стабилноста дури и во овие интервали, а перформансите може дополнително да се подобрат преку фино подесување на архитектурата и оптимизација на хиперпараметрите.

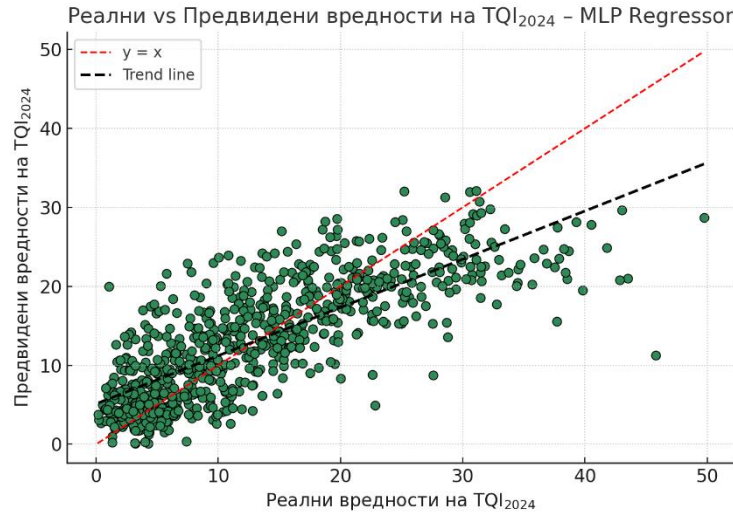
Заклучно, примената на MLP Regressor овозможува балансирана комбинација на точност, стабилност и способност за моделирање на сложени зависимости во податоците за TQI_{2024} . Иако резултатите се нешто послаби од оние на Random Forest, MLP демонстрира предност во флексибилноста и способноста да се прилагоди на различни структури на податоци. Моделот обезбедува резултати споредливи со полиномиалната регресија, но со подобра можност за учење на скриени релации меѓу параметрите, што го прави релевантна алатка за анализа на комплексни инженерски системи. Со дополнителна оптимизација, MLP може да се развие во стабилна предвидувачка компонента во рамките на системите за интелегентно одржување на железничката инфраструктура.

7.6.1. Визуелна анализа на резултатите

- **Анализа на графичкиот приказ: реални vs предвидени вредности (Scatter дијаграм)**

На слика 65 прикажана е споредба помеѓу реалните вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}) и вредностите добиени со примена на моделот Multilayer Perceptron (MLP).

Поголемиот дел од точките се распределени во близина на линијата на совпаѓање, што потврдува дека моделот генерира стабилни и прецизни предвидувања за најголем дел од делниците. Најдобра точност се забележува во интервалот од $TQI = 10$ до $TQI = 25$, кој е најзастапен во базата на податоци и одговара на делници со умерено ниво на геометриска деградација. Во овој интервал, MLP моделот покажува најдобра способност да ги репродуцира реалните вредности, со минимални отстапувања.

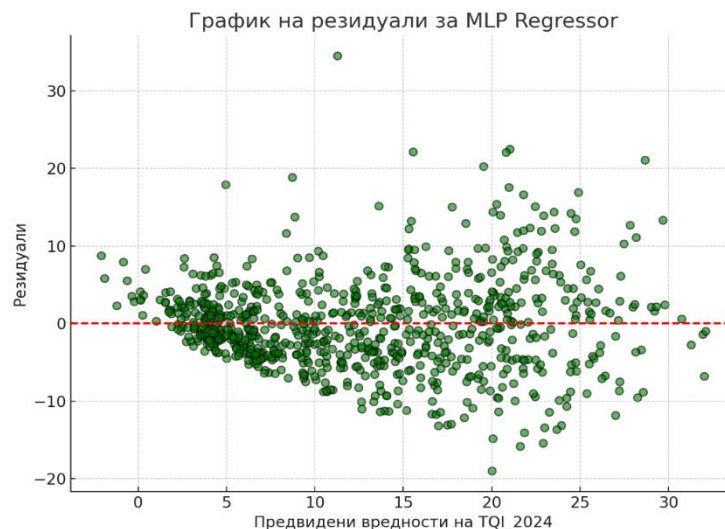


Слика 65. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со примена на Neural Network MLP Regressor. (Извор: сопствени пресметки)

Кај делниците со повисоки вредности на индексот на квалитет на колосекот ($TQI > 30$) се забележува систематско отстапување на точките под линијата на совпаѓање, што значи дека моделот во овие случаи предвидува пониски вредности од реалните. Иако овој ефект е поблаг споредено со резултатите добиени од линеарните модели, сепак останува присутен. Најверојатно се должи на тоа што делниците со сериозна деградација се многу помалку застапени во базата на податоци, па моделот има ограничен број примери врз основа на кои може да научи прецизни шеми на однесување за овој интервал на деградации. Како резултат, моделот покажува намалена точност во интервалите каде што се јавуваат најекстремните вредности на TQI .

- **Анализа на графичкиот приказ: График на резидуали**

На слика 66 прикажана е распределбата на резидуалите за MLP Regressor моделот, во однос на предвидените вредности на TQI_{2024} . Графикот ги прикажува отстапувањата помеѓу реалните и пресметаните вредности, при што црвената хоризонтална линија ја означува нултата референтна линија.



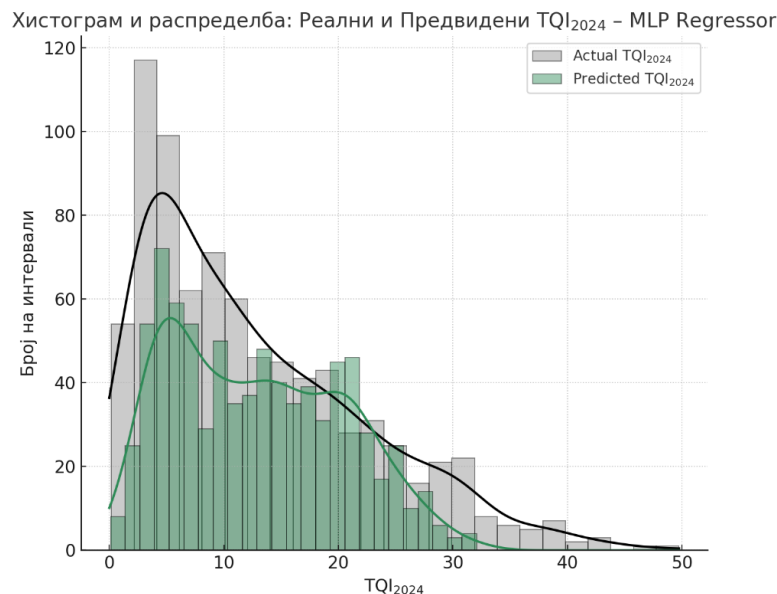
Слика 66. График на резидуали за MLP Regressor моделот за TQI_{2024} . (Извор: сопствени пресметки)

Во интервалот од $TQI = 10$ до $TQI = 25$, каде што е концентриран најголемиот дел од податоците, точките се распоредени симетрично околу нултата линија и нема значајна варијабилност. Ваквиот распоред потврдува дека моделот обезбедува стабилни и конзистентни предвидувања за делници со умерена состојба. И при повисоки вредности на TQI не се појавува тренд или закривеност на резидуалите, но се забележува поширока дисперзија на резидуалите. Ова се должи на ограничената застапеност на делници со сериозна деградација во базата на податоци, поради што моделот не успева да научи доволно стабилна врска помеѓу променливите и вредностите на TQI во тој интервал.

Резидуалите не покажуваат зависност од предвидените вредности, односно нивната вредност останува приближно слична низ целиот интервал на TQI . Ова значи дека точноста на моделот не се намалува со зголемување на вредностите на TQI , туку останува релативно стабилна. Ваквиот распоред на грешките потврдува дека MLP Regressor одржува слично ниво на прецизност и кај делници со пониска и со повисока геометрирска деградација. Тоа е важна карактеристика при инженерска анализа, бидејќи овозможува доверлива процена и кај делници што бараат приоритетна интервенција.

- Анализа на графичкиот приказ: Хистограм

На слика 67 прикажана е споредбена распределба на реално измерените вредности на TQI_{2024} (со сива боја) и вредностите предвидени со MLP Regressor моделот (со зелена боја).



Слика 67. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со MLP Regressor. (Извор: сопствени пресметки)

Во интервалот од $TQI = 0$ до $TQI = 20$, предвидената распределба од MLP моделот речиси целосно се поклопува со реалната. Во овој интервал, кој ги опфаќа делниците со ниска до умерена деградација, моделот постигнува висока прецизност благодарение на стабилната структура на податоците и малиот степен на варијабилност.

Кај вредности на TQI поголеми од 25, моделот задржува релативно добра усогласеност со реалната распределба. Иако се присутни одделни отстапувања, предвидените вредности покажуваат дека MLP Regressor успешно препознава обрасци и кај делници со изразена деградација. Ова потврдува дека моделот е способен да ги обработи и

посложените случаи со високи вредности на TQI, што е особено важно за техничка процена на ризични делници од трасата.

При вредности на TQI помеѓу 10 и 15, предвидувањата се стабилни и покажуваат добра усогласеност со реалната дистрибуција. Овој резултат потврдува дека моделот има капацитет да детектира и локални варијации, што е клучно при анализа на податоци со сложена и разновидна структура.

MLP Regressor е модел кој ефикасно ги препознава сложените врски помеѓу влезните параметри и целната променлива, при што ја следи реалната распределба на податоците со висока точност. Ова е особено значајно при анализа на влијанието на инфраструктурни и оперативни фактори врз индексот на квалитет на колосекот.

7.6.2. Евалуација на резултатите од моделот

Резултатите од примената на MLP Regressor прикажуваат стабилна точност и висока флексибилност при моделирање на сложени релации меѓу влезните параметри и индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}). Постигнатиот коефициент на детерминација ($R^2 = 0.63$) опфаќа околу 63% од варијациите на TQI_{2024} , што претставува подобрување во однос на линеарната и Ridge регресијата ($R^2 = 0.57$) и резултат приближно еднаков на полиномната регресија ($R^2 = 0.64$). Ваквото ниво на точност потврдува дека MLP има капацитет да обработува податоци со сложена структура и да воспостави стабилни релации меѓу влезните и излезните параметри.

Средната апсолутна грешка ($MAE = 4.39$) и коренот од средната квадратна грешка ($RMSE = 5.88$) се во интервал што одразува умерени просечни отстапувања меѓу предвидените и реалните вредности. Малата разлика меѓу RMSE и MAE значи дека изолирани повисоки грешки имаат ограничено влијание врз целокупната стабилност на моделот. Повеќеслојната архитектура на MLP овозможува обработка на нелинеарни односи и прецизна адаптација на моделот дури и при зголемена варијабилност на податоците.

Визуелните анализи (scatter дијаграм, график на резидуали и хистограм) прикажуваат добра усогласеност меѓу реалните и предвидените вредности. Точките во scatter дијаграмот се распоредени блиску до дијагоналната линија $y = x$, што ја потврдува малата разлика меѓу двата сета податоци. Резидуалите се рамномерно распоредени околу нултата линија, што говори за стабилност на предвидувањата низ различните интервали на TQI. Во хистограмот постигната е слична форма и распределба меѓу реалните и предвидените вредности, со што моделот доследно ја репродуцира структурата на податоците.

MLP Regressor обезбедува оптимален однос меѓу точност и стабилност и може да се примени како доверлив инструмент за инженерска анализа на геометриската состојба на колосекот. Моделот е особено корисен при процена на делници со умерена и повисока деградација, каде што е потребна зголемена чувствителност на нелинеарни и меѓусебно зависни влијанија. Со дополнително фино подесување и проширување на архитектурата, MLP може да се развие во основа за системи за предвидување со висока оперативна применливост во одржувањето на железничката инфраструктура.

7.7. Support Vector Regression (SVR)

Support Vector Regression¹⁰ (SVR) беше применет како метод за предвидување на индексот на квалитет на колосекот за 2024 година (TQI_{2024}), со цел да се моделираат сложените и потенцијално нелинеарни релации меѓу влезните параметри и процесите на деградација. Моделот користи ϵ -зона на толеранција и минимизира само значајни грешки, со што овозможува стабилни и контролирани предвидувања дури и во присуство на варијации и корелации меѓу податоците. Благодарение на оваа карактеристика, SVR е применлив во инженерски анализи каде што класичните модели за регресија имаат ограничена способност за опишување на сложени и нелинеарни меѓузависности.

Следната табела ги прикажува пресметаните вредности на четирите основни статистички мерки за евалуација на перформансите на моделот.

Табела 41. Вредности на статистички мерки за евалуација на перформансите на Support Vector Regression (SVR) при предвидување на TQI_{2024} (Извор: сопствени пресметки)

Мерка	Вредност
R^2	0.68
MAE	4.18
RMSE	5.41
MSE	29.26

Коефициентот на детерминација ($R^2 = 0.68$) покажува дека приближно 68% од варијациите во TQI_{2024} се објаснети преку SVR моделот. Вредноста ја позиционира оваа техника меѓу најуспешните во рамките на применетите модели. Постигнатата прецизност потврдува дека SVR има способност да ги прикаже комплексните и нелинеарни односи меѓу параметрите, особено при присуство на меѓусебно зависни влијанија кои класичните статистички модели не можат стабилно да ги репрезентираат.

Средната апсолутна грешка ($MAE = 4.18$) изнесува приближно ± 4.2 TQI – поени, што претставува подобрување во однос на линеарната и Ridge регресијата, и е блиска до вредностите постигнати со Random Forest. Ваквото ниво на точност е прифатливо за инженерска примена и овозможува доверлива проценка на состојбата на колосекот во делници со умерена деградација. Во случаи каде што вредностите на TQI се блиску до граничните прагови за техничка интервенција, и ваквото просечно отстапување може да има значење при донесување на одлуки за одржување, поради што резултатите треба внимателно да се интерпретираат во критичните интервали.

Коренот од средната квадратна грешка ($RMSE = 5.41$) ја претставува типичната големина на грешките, земајќи ги предвид и случаите со повисоки отстапувања. Малата разлика меѓу RMSE и MAE значи дека екстремните грешки се поединечни и не ја нарушуваат стабилноста на моделот. Вредноста од 5.41 TQI – поени покажува дека SVR успева да ја задржи точноста и кај повисоки вредности на TQI, односно кај делници со изразена деградација. Оваа карактеристика го прави моделот особено соодветен за инженерски анализи на сегменти со посложена состојба на колосекот, каде што е потребна висока доверливост во проценката.

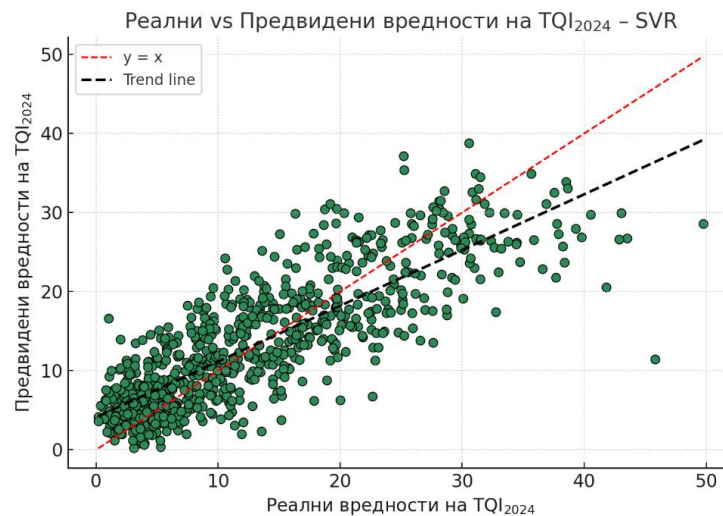
¹⁰ Support Vector Regression е моќна техника на машинско учење, која се користи за предвидување на континуирани вредности со наоѓање функција (хиперрамнина) што најдобро одговара на податоците, додека дозволува одредена маргина на грешка околу предвидувањата.

Врз основа на добиените статистички показатели може да се заклучи дека SVR моделот обезбедува високо ниво на точност и стабилност при предвидување на индексот на квалитет на колосекот. Со R^2 вредност од 0.68 и релативно ниски MAE и RMSE, моделот се издвојува како една од најпрецизните и најробусните техники во ова истражување. Умерената разлика помеѓу MAE и RMSE дополнително потврдува дека отстапувањата се контролирани и дека резултатите се стабилни во различни интервали на податоците. Во споредба со Random Forest, SVR обезбедува нешто пониска точност, но покажува висока стабилност и конзистентност на резултатите, што го прави применлив за предвидување и анализа на геометриската состојба на железничката инфраструктура.

7.7.1. Визуелна анализа на резултатите

- **Анализа на графичкиот приказ: реални vs предвидени вредности (Scatter дијаграм)**

На слика 68 се прикажани реално измерените вредности на TQI_{2024} (хоризонтална оска) и вредностите предвидени со SVR моделот (вертикална оска).



Слика 68. Дијаграм на дисперзија помеѓу реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} добиени со примена на SVR. (Извор: сопствени пресметки)

При вредности на TQI во интервалот од 10 до 25, точките се распоредени релативно блиску до линијата на совпаѓање, без појава на систематски отстапувања. Овој резултат потврдува дека моделот обезбедува стабилни и точни предвидувања кај делници со умерена состојба на колосекот, што воедно претставува и најзастапениот интервал на вредности на TQI во анализираната база на податоци.

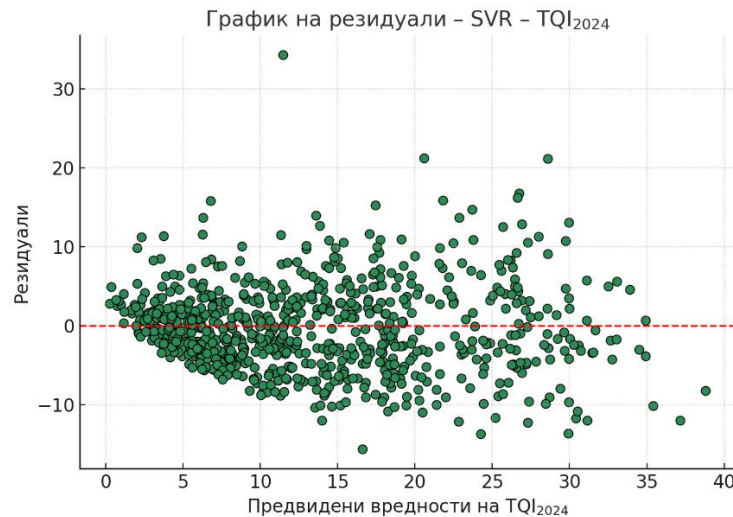
За вредности на TQI поголеми од 25 се забележуваат поизразени отстапувања од линијата на совпаѓање. Во овој интервал, SVR моделот покажува намалена прецизност при предвидување на реалните состојби. Една од можните причини е ограничената застапеност на податоци со повисоки вредности на TQI во тренинг-сетот, што го ограничува капацитетот на моделот да научи стабилни релации за овие посложени случаи.

Грешките се распоредени на обете страни од референтната линија, без доминантна појава на систематски повисоки или пониски предвидувања во однос на реалните вредности. Ова го претставува стабилното однесување на моделот без изразена пристрасност, што е важно при донесување инженерски одлуки по целата должина на трасата.

Scatter дијаграмот покажува дека SVR моделот успешно ги репрезентира поголемиот дел од вредностите на TQI, со задоволителна точност во интервалите со умерени вредности. Сепак, точноста опаѓа кај делниците со висока деградација, што бара дополнителна претпазливост при инженерска интерпретација и донесување на одлуки.

- **Анализа на графичкиот приказ: График на резидуали**

Графикот на слика 69 ја прикажува распределбата на резидуалите за моделот Support Vector Regression (SVR), каде што на хоризонталната оска се претставени предвидените вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI_{2024}), а на вертикалната оска се прикажани разликите меѓу реалните и предвидените вредности.



Слика 69. График на резидуали за SVR моделот за TQI_{2024} . (Извор: сопствени пресметки)

Во интервалот на предвидени вредности на TQI од 10 до 25, резидуалите се распоредени рамномерно, без видливи шеми или трендови. Моделот се однесува стабилно во овој интервал, каде што се наоѓаат повеќето делници со умерена геометриска состојба. Нема појава на систематски отстапувања, што значи дека предвидувањата се во согласност со реалните вредности низ овој дел од податоците.

Кај вредности на TQI поголеми од 25 се забележуваат неколку отстапувања со поголем интензитет. Иако не се појавува јасна шема, прецизноста на моделот е намалена во овој интервал. Ова може да има значење при идентификација на делници со сериозна деградација, каде што се бара повисоко ниво на сигурност во предвидувањата.

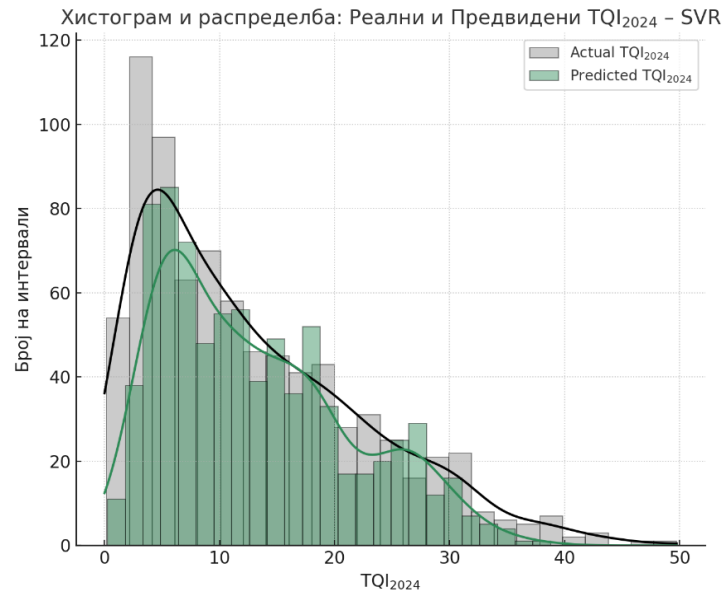
Во целина, распределбата на резидуалите не покажува појава на систематска грешка. SVR моделот постигнува приближно еднаква точност во различните интервали на вредности на TQI. Ова го прави погоден за инженерска примена, каде што е потребна стабилност на предвидувањата низ различни состојби на колосекот.

- **Анализа на графичкиот приказ: Хистограм**

Хистограмот овозможува споредба меѓу распределбата на реалните и предвидените вредности на TQI_{2024} за целата делница.

Во интервалот на TQI вредности од 5 до 20, каде што е највисока концентрацијата на податоци, SVR моделот успешно ја следи реалната фреквенциска распределба и дава точни предвидувања за делници со просечна геометриска состојба на колосекот. Меѓутоа, при

вредности на TQI поголеми од 25, моделот покажува ограничена способност да ги идентификува делниците со изразена геометриска деградација, што доведува до намален број критични делници во предвидената распределба. Ова претставува значајно ограничување во инженерски контекст, бидејќи директно влијае на прецизноста при планирање на интервенции на колосекот.



Слика 70. Хистограм на реалните и предвидените вредности на TQI₂₀₂₄ добиени со SVR. (Извор: сопствени пресметки)

И покрај овие отстапувања, предвидената распределба има слична форма со реалната, со што се задржува приближна усогласеност на моделот со целокупната распределба на податоците.

7.7.2. Евалуација на резултатите од моделот

Резултатите добиени со примена на Support Vector Regression (SVR) покажуваат солидни перформанси при моделирање на индексот на квалитет на колосекот за 2024 година (TQI₂₀₂₄), особено во интервалите со умерени вредности. Постигнатиот коефициент на детерминација изнесува $R^2 = 0.68$, односно околу 68 % од варијациите на TQI₂₀₂₄ се опфатени преку моделот. Вредноста е повисока во однос на линеарната ($R^2 = 0.57$), Ridge ($R^2 = 0.57$) и MLP регресијата ($R^2 = 0.63$), и многу блиска до резултатот на полиномиалниот модел ($R^2 = 0.64$). Прецизноста е речиси идентична со Random Forest ($R^2 = 0.69$), што го позиционира SVR меѓу најуспешните модели во рамките на истражувањето.

Вредностите MAE = 4.18 и RMSE = 5.41 се во интервал на умерени отстапувања, со задржана стабилност и ограничен број на поголеми грешки. Моделот обезбедува стабилни предвидувања во интервали со средни TQI вредности, но има ограничена прецизност при препознавање на делници со изразена деградација, особено за вредности на TQI поголеми од 25.

Визуелните анализи – scatter дијаграм, график на резидуали и хистограм, ја потврдуваат стабилноста на моделот. Scatter дијаграмот прикажува висока концентрација на точките околу дијагоналната линија во интервалот TQI = 10 – 25, што соодветствува на најголемиот број од делниците со умерена состојба. Во зоната со повисоки TQI вредности (над 25) се забележуваат отстапувања, што веројатно се резултат на ограничена застапеност

на такви примероци во податоците за тренирање. Графикот на резидуали покажува рамномерна распределба на грешките околу нултата оска, без систематски отстапувања, а формата на хистограмот на реалните и предвидените вредности е слична во опсегот $TQI = 5 - 20$, со мало намалување на фреквенцијата на високи TQI вредности.

Врз основа на добиените резултати и графичките прикази, може да се заклучи дека SVR обезбедува високо ниво на стабилност и точност при предвидување на TQI_{2024} . Со $R^2 = 0.68$ и ниски вредности на MAE и RMSE, моделот се вбројува веднаш зад Random Forest според перформансите. Иако точноста се намалува кај делниците со повисока деградација, резултатите остануваат конзистентни во интервалите со најголема застапеност на податоци. Поради овие карактеристики, SVR е соодветен за инженерска примена при оценка и планирање на интервенции на делници со стабилна или умерена состојба на колосекот.

7.8. Пресметка и анализа на стапката на деградација

За дополнително разбирање на долгорочните промени во состојбата на колосекот, беше пресметана стапката на деградација преку споредба на вредностите на индексот на квалитет на колосекот (TQI) во три временски периоди: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024. Овие пресметки овозможува детална просторна и временска анализа на динамиката на геометриските промени, што претставува клучен показател за ефективност на применетите модели и влијанието на активностите за одржување.

Пресметката и визуелизацијата на стапките на деградација претставуваат надградба на резултатите добиени со предиктивното моделирање и обезбедуваат дополнителна основа за формулирање на препораки за одржување и планирање на интервенции.

Позитивните вредности на ΔTQI означуваат влошување на состојбата на колосекот, бидејќи повисоки вредности на TQI се поврзани со полоша геометриска состојба. Спротивно, негативните вредности на ΔTQI означуваат подобрување на геометријата на колосекот. Испрекинатата сива хоризонтална линија на графиците ја претставува референтната вредност $\Delta TQI = 0$, што соодветствува на стабилна состојба без значајни промени во квалитетот на колосекот помеѓу анализираните временски интервали.

Оваа анализа овозможува идентификација на делници со изразени трендови на влошување или подобрување, што служи како основа за детални инженерски проценки и планирање на активности за одржување со фокус на приоритизирање и интервенции.

7.8.1. Стапка на деградација за периодот 2017 – 2019

На графикот прикажан на слика 71 е претставена просторната распределба на промените во индексот на квалитет на колосекот (ΔTQI) по должина на делницата Колашин – Подгорица за периодот 2017–2019 година. Промената ΔTQI пресметана е како разлика помеѓу измерените вредности TQI_{2019} и TQI_{2017} , при што анализата е спроведена врз хомогени делници со должина од 20 метри на делница од трасата во должина од 16 км. Овој интервал е избран бидејќи во рамки од 20 метри не се очекуваат значајни локални промени во геометријата, што овозможува стабилна просторна анализа на трендовите на деградација.

Како што е прикажано, значителен дел од трасата покажува позитивни вредности на ΔTQI , што значи дека индексот на квалитет на колосекот е зголемен во однос на претходниот период, односно состојбата на геометријата е влошена. Највисоки вредности, над 20, се регистрирани во интервали помеѓу km 386 и km 388, како и околу km 396, каде е забележана најизразена деградација на колосекот.

Истовремено се присутни и делници со негативни вредности на ΔTQI , што значи дека состојбата на геометријата е подобрена во однос на претходниот период. Овие промени најверојатно произлегуваат од ефикасни активности за одржување.



Слика 71. Стапка на деградација на делници по стационача за периодот 2017–2019 година (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења на TQI за периодот 2017–2019)

На графикот, испрекинатата сива линија ја означува референтната вредност $\Delta TQI = 0$, која ги разделува делниците со стабилна состојба (под линијата) од оние со забележливо влошување (над линијата). Оваа граница служи како критериум за идентификација на делници со промена во квалитетот на колосекот во анализираниот двегодишен период.

7.8.2. Стапка на деградација за периодот 2019 – 2022

Графичкиот приказ на слика 72 ја прикажува просторната распределба на промените во индексот на квалитет на колосекот (ΔTQI) по должина на трасата Колашин – Подгорица за периодот 2019–2022 година. Вредностите на ΔTQI се добиени како разлика помеѓу измерените TQI_{2022} и TQI_{2019} , со што се овозможува следење на геометриските промени во наведениот временски интервал.



Слика 72. Стапка на деградација на делници по стационача за периодот 2019–2022 година (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења на TQI за периодот 2019–2022)

Во анализираниот период доминираат негативни вредности на ΔTQI , што значи дека индексот на квалитет на колосекот е намален, а геометријата е подобрена во споредба со претходниот период. Овој тренд е резултат на спроведени активности за машинско

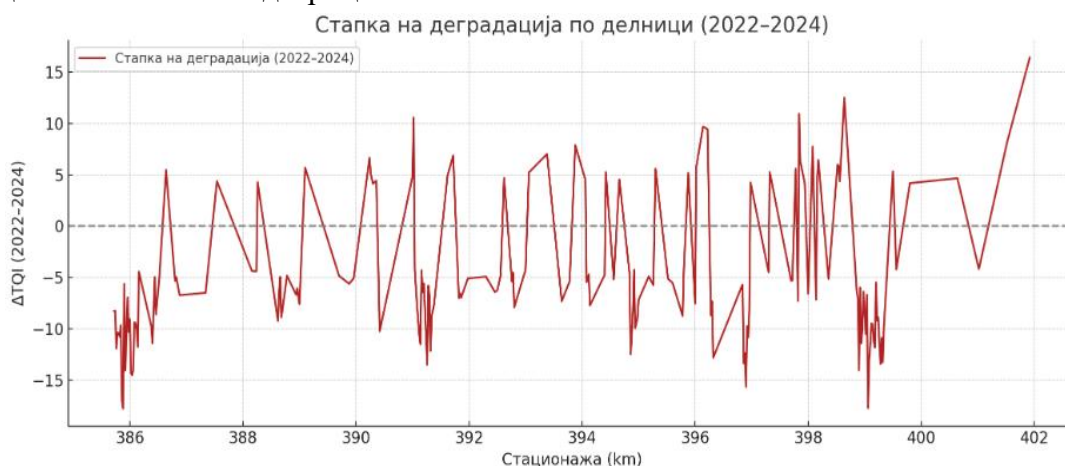
одржување, особено подбивање на засторот и регулирање на колосекот, кои довеле до стабилизирање на состојбата по должина на делницата Колашин – Подгорица.

Сепак, забележани се и неколку изолирани делници со позитивни вредности на ΔTQI , особено околу стационажите km 391, km 396 и km 398. Овие локални влошувања може да се поврзат со инфраструктурни ограничувања, специфични теренски услови или ограничена ефикасност на спроведените мерки за одржување.

Присуството на вакви локализирани влошувања ја истакнува потребата од детална техничка анализа и корективни мерки насочени кон критичните делници од трасата.

7.8.3. Стапка на деградација за периодот 2022 – 2024

Графикот на слика 73 ја прикажува просторната распределба на промената во индексот на квалитет на колосекот (ΔTQI) за периодот 2022–2024 година, по должина на делницата Колашин – Подгорица.



Слика 73. Стапка на деградација на делници по стационажа за периодот 2022–2024 година (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења на TQI за периодот 2022–2024)

Во овој временски период се забележува поголема варијабилност во вредностите на ΔTQI , со зголемен број делници кај кои е присутна позитивна стапка на деградација, особено по стационажа km 396+000. Влошувањето на геометриската состојба на овие делници е потенцијално резултат на зголемено сообраќајно оптоварување, стареење на инфраструктурните елементи или недоволна ефективност на спроведените активности за одржување.

Сепак, во текот на истиот период, значителен дел од делниците продолжуваат да покажуваат негативни вредности на ΔTQI , што значи дека состојбата се подобрува. Најизразени подобрувања се забележани во зоните околу км 386+000 – 387+000 и км 399+000 – 400+000, со вредности на ΔTQI под -10 . Овие резултати се во согласност со делници на кои биле извршени интервенции за машинско одржување, што довеле до намалување на дефектите во геометријата на колосекот.

7.8.4. Идентификација на делници со највисока просечна стапка на деградација во периодот 2017–2024

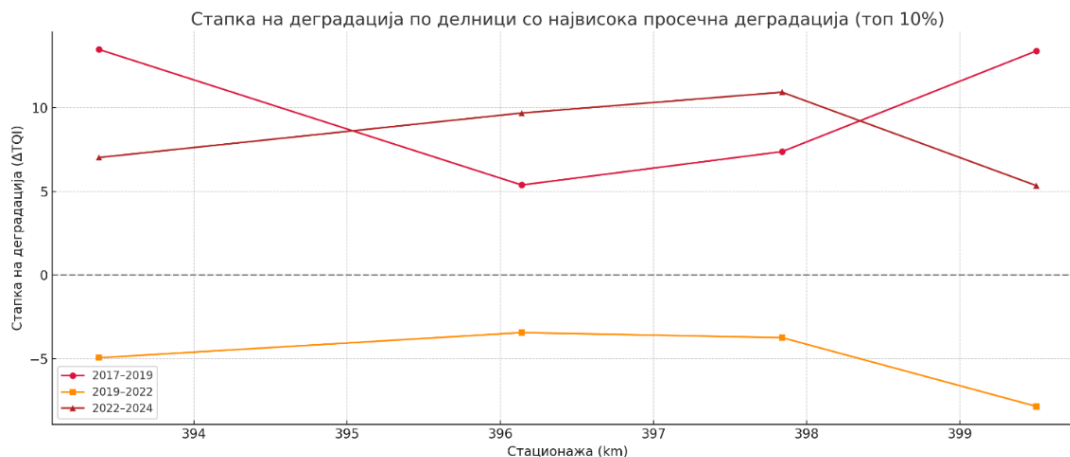
Во овој дел, анализата е насочена кон идентификација и опис на железничките делници кои покажуваат највисоки вредности на просечна стапка на деградација на геометријата на колосекот во периодот од 2017 до 2024 година. За таа цел, врз основа на податоците за индексот на квалитет на колосекот (TQI), беше пресметана стапката на

деградација за три последователни временски интервали: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024. Потоа беа издвоени делниците кои припаѓаат на горниот 10-ти перцентил според просечната вредност на стапката на деградација во наведениот период. Анализата овозможува издвојување на критични делници со забрзана деградација, кои претставуваат приоритетни локации за интервенции и стратеско планирање на одржувањето.

Овој пристап овозможува насочување кон најкритичните делници од трасата Колашин – Подгорица, каде што континуираното и изразено влошување на геометриските карактеристики има потенцијал да влијае врз квалитетот и безбедноста на инфраструктурата. Анализата ги прикажува трендовите на долгорочно деградирање, но истовремено ги евидентира и периодите на привремено подобрување, што овозможува прецизно планирање на интервенциите со приоритет на делниците со највисок ризик.

Во продолжение прикажана е детална просторна и временска дистрибуција на стапките на деградација за овие делници, заедно со анализа на потенцијалните фактори што придонесуваат за нивното континуирано деградирање.

На графикот на Слика 74 прикажана е просторната распределба на стапката на деградација (ΔTQI) за делниците што припаѓаат на горниот десетти перцентил според просечната вредност на деградација во периодот 2017–2024 година. Станува збор за најкритичните делници на трасата, кај кои е евидентирано континуирано и изразено деградирање на состојбата на колосекот.



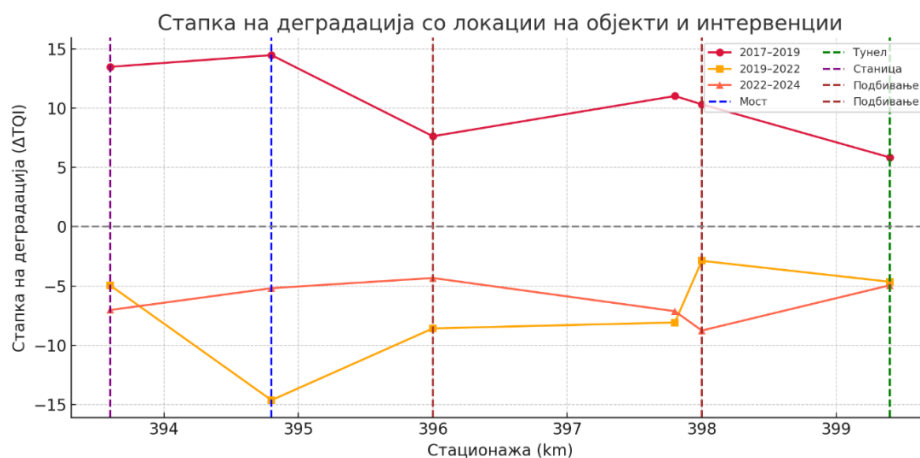
Слика 74. Стапка на деградација по делници со највисока просечна деградација (топ 10%) за трите временски периоди (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења на TQI)

Делниците во интервалот од приближно km 394+000 до km 399+000 покажуваат изразена тенденција на континуирана деградација. Во периодите 2017–2019 и 2022–2024 е забележано значително зголемување на вредностите на ΔTQI , што претставува раст на индексот на квалитет и со тоа влошување на геометриската состојба на колосекот.

Спротивно на тоа, во периодот 2019 – 2022 е регистрирана негативна вредност на ΔTQI во речиси сите анализирани делници, што значи дека состојбата на колосекот е подобрена во однос на претходниот период, најверојатно како резултат на спроведени интервенции за одржување, вклучувајќи подбивање на засторот и регулирање на колосекот. Во периодот 2022 – 2024 повторно се забележува зголемување на вредностите на ΔTQI , што значи дека ефектите од претходните интервенции биле краткотрајни и не довеле до долгорочна стабилизација на колосекот.

Цикличниот образец на привремено подобрување, по кој повторно се јавува деградирање, е типичен за делници со длабински структурни проблеми. Најчести фактори што придонесуваат за вакво однесување се недоволна носивост на долниот строј, присуство на сложени инфраструктурни објекти како тунели и мостови, како и зголемено сообраќајно оптоварување. Поради овие карактеристики, ваквите делници треба да бидат третирани како приоритетни при долгорочното планирање на активности за одржување и санација.

Дополнителната просторна анализа, прикажана на слика 75, ги поврзува најризичните делници со локациите на инфраструктурни објекти и извршени интервенции за машинско одржување. Резултатите покажуваат дека најголем дел од најризичните делници се наоѓаат во непосредна близина на мостови и тунели, каде што сложените геотехнички услови, придонесуваат за зголемена деградација.



Слика 75. Стапка на деградација со прикажани локации на објекти и интервенции (мостови, тунели, станици, подбивање). (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења и евиденција за интервенции)

Присуството на станици во близина на овие делници претставува дополнителен фактор што може да го забрза процесот на деградирање, како резултат на честото забавување и забрзување на возовите, кое предизвикува зголемено динамичко оптоварување на колосекот.

Дополнително, се забележува дека во дел од овие критични делници, и покрај спроведените интервенции за подбивање, не е забележано значајно подобрување. Веројатните причини се комплексни технички проблеми, како нестабилен долен строј, лоши услови за одводнување или присуство на геотехнички нестабилни зони, особено во близина на мостови и тунели.

Анализата овозможува прелиминарна проценка на причинско-последичните врски меѓу инфраструктурните фактори и стапката на деградација, како и идентификација на приоритетни области за интервенција. Ваквиот пристап претставува основа за стратешко управување со инфраструктурата, засновано на квантитативни показатели и рационално планирање на активностите за одржување.

7.9. Анализа на умерена и континуирана деградација на геометријата на колосекот

За подбро да се разберат долгорочните трендови во деградацијата на геометријата на колосекот, спроведена е системска и просторна анализа на податоците за индексот на квалитет на колосекот (TQI) во временскиот интервал 2017–2024 година. Анализата овозможува идентификација на точки на промена во трендот на деградација, како и

прецизна локализација на делници со континуирано и постепено намалување на геометриската стабилност.

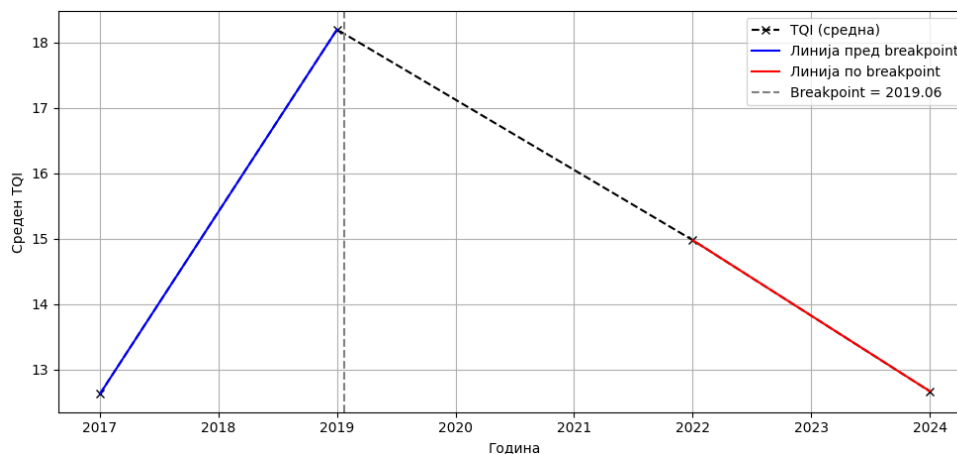
7.9.1. Анализа на умерена и континуирана деградација со примена на парцијална линеарна регресија Piecewise Linear Regression

Со цел да се идентификуваат делници со системска и континуирана деградација на геометријата, применета е парцијална линеарна регресија¹¹ (Piecewise Linear Regression) врз основа на просечните годишни вредности на индексот на квалитет на колосекот (TQI) по делници, за четири временски точки: 2017, 2019, 2022 и 2024 година. Методологијата се заснова на поделба на временската серија во два подинтервали, дефинирани преку точки на прекин (breakpoint) со година, при што во секој интервал е применета посебна линеарна регресија. Овој пристап овозможува попрецизно детектирање на промени во трендот на деградирање, како и разликување меѓу стабилни и нестабилни фази на геометриското однесување на колосекот.

Табела 42. Параметри од парцијална линеарна регресија за утврдување на промена во трендот на деградација на TQI пред и по 2019 година. (Извор: сопствени пресметки)

Параметар	Вредност
Breakpoint година на прекин	2019,06
Наклон пред год. на прекин	2,787176563
Наклон по год. на прекин	-1,155816976
Δslope	-3,942993539

Резултатите од анализата (Слика 76 и Табела 42) ја утврдуваат почетната точка на промена во трендот во 2019 година (2019.06), што претставува почеток на континуирана деградација или, пак, промена во динамиката на деградацијата на геометријата на колосекот.



Слика 76. Системска анализа на деградации со прикажан просечен TQI по години и пресметана преломна точка (breakpoint) во 2019 година, со различен тренд пред и по неа. (Извор: Сопствени пресметки)

Позитивниот наклон од +2.79 во периодот 2017–2019 покажува влошување на состојбата на колосекот, со раст на просечниот TQI што укажува на поголеми отстапувања од идеалната геометрија. По годината во која има прекин, наклонот преминува во негативна вредност од –1.16, што е во согласност со фаза на стабилизирање или благо подобрување на

¹¹ Парцијалната линеарна регресија моделира податоци со вклопување на одделни линеарни равенки на различни сегменти (парчиња) од податоците, поврзани на специфични вредности на „точка на прекин“ или „јазол“, за подобро да се опфатат нелинеарните врски каде што една линеарна равенка не е доволна, користејќи фиктивни променливи (dummy variables) за да ги дефинираат сегментите и нивните променливи.

состојбата. Таквата промена временски се совпаѓа со изведени интервенции за одржување или со промени во експлоатациските услови, како што се намалено оптоварување или активности за санација.

Визуелната репрезентација (Слика 76) го прикажува преминот од растечки кон опаѓачки тренд на TQI, со означена точка на пресврт во 2019 година. Оваа промена е во согласност со забележаното намалување на просечните вредности на TQI, што соодветствува на подобрување на геометриската состојба на колосекот.

Овие резултати имаат значајна практична вредност бидејќи:

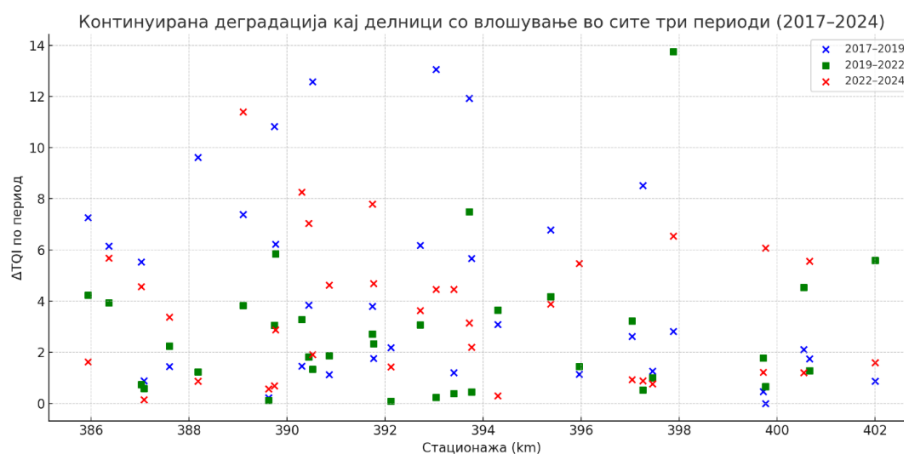
- овозможуваат квантитативна проценка на промената во трендот на континуирана деградација преку пресметка на Δslope ;
- помагаат во прецизно лоцирање на моментот кога настанала промена во однесувањето на системот;
- создаваат основа за анализа на влијанието од интервенции или настани што се случиле во 2019 година и кои се поврзани со забавување или прекин на негативниот тренд.

Идентификувањето на вакви системски континуирани деградации претставува основа за ефективно долгорочно планирање на одржувањето, овозможува објективна проценка на ефикасноста на спроведените мерки и обезбедува навремена поддршка при идентификација и управување со слични сценарија во иднина.

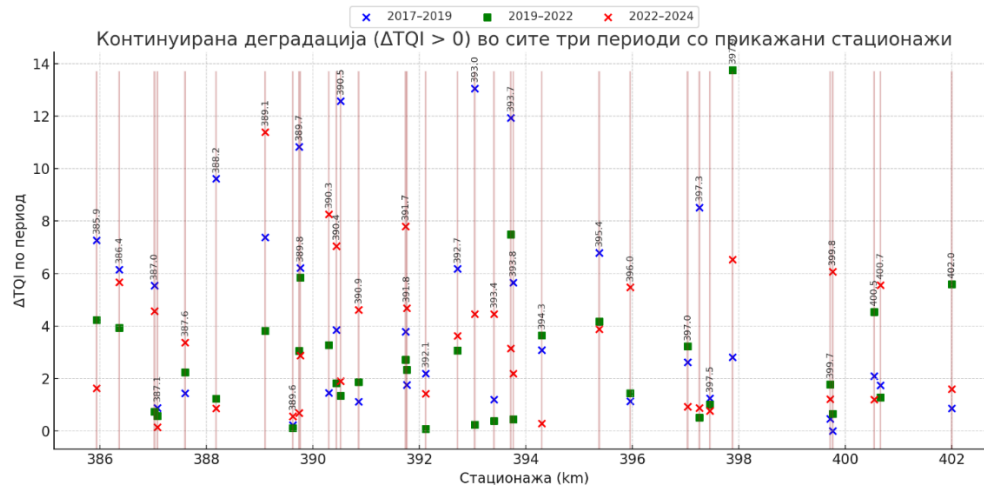
7.9.2. Локализација на деградациите по стационожа

Во рамки на анализата на деградацијата на геометријата на колосекот, спроведена е просторна проценка на континуираните деградации преку графичка презентација на критични точки по стационожа, поединечно за секој временски интервал, како и за вкупниот период 2017–2024. Главната цел на оваа анализа е да се идентификуваат делниците со најизразена, зачестена и долготрајна деградација, со што се воспоставува основа за насочено планирање и приоритизирање на идните интервенции за одржување.

Резултатите прикажани на слика 77 и слика 78 ја илустрираат динамиката на континуираната деградација на геометријата на колосекот по должина на трасата, во три последователни временски интервали: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024. Трендот на еволуција на деградацијата покажува постепено интензивирање на нестабилноста, при што во поновите периоди се јавува зголемена просторна концентрација на критични делници.



Слика 77. Просторна дистрибуција на континуирана деградација на колосекот по временски интервали.
(Извор: Сопствени пресметки)



Слика 78. Делници со повторувачка континуирана деградација ($\Delta TQI > 0$) во сите три анализирани интервали. (Извор: Сопствени пресметки)

- Во периодот 2017–2019, континуираните деградации се појавуваат дисперзирано по целата траса, без изразена просторна концентрација. Промените во ΔTQI се со умерена фреквенција и интензитет, што може да се толкува како почетна фаза на локализирани нарушувања во геометријата. Овој период претставува референтна основа за следење на понатамошниот развој на деградациските процеси и за оценка на ефектите од интервенциите во наредните години.
- Во периодот 2019–2022, се забележува пораст на бројот на делници со изразена деградација, особено во зоната помеѓу km 394 и km 400. Во споредба со претходниот период, деградациите се појавуваат со зголемена просторна групираност, типична за делници со системски нарушувања во стабилноста на трасата. Ваквиот тренд може да биде резултат на недоволна ефикасност на активностите за одржување или на акумулирани деградации и оштетувања, кои бараат дополнителна анализа.
- Во периодот 2022–2024, деградацијата е најинтензивна и се јавува речиси низ целата траса, при што голем дел од проблематичните точки се повторуваат од претходните периоди. Повторливоста и обемот на овие деградации упатуваат на длабински проблеми со стабилноста на долниот строј, кои не можат да се надминат со стандардни мерки за машинско одржување. Овие делници се издвојуваат како приоритетни за санација, вклучувајќи конструктивни интервенции и ревизија на постоечката стратегија за одржување.

Во практична смисла, овие делници треба да бидат интегрирани во програма за:

- ремонт или целосна реконструкција на долниот и горниот строј;
- зголемување на фреквенцијата на технички инспекции со фокус на геометриска стабилност;
- воспоставување на систем за континуирано следење преку прецизни мерења и геодетски мониторинг.

Во табелата подолу се прикажани делниците (изразени преку стационажа во километри) кај кои е евидентирана појава на континуирани деградации во сите три анализирани временски периоди: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024.

Табела 43. Делници со идентификувани континуирани деградации во сите три анализирани временски периоди прикажани преку стационача и пресметани стапки на деградација ΔTQI . (Извор: сопствени пресметки)

Стационача (km)	ΔTQI (2017–2019)	ΔTQI (2019–2022)	ΔTQI (2022–2024)
385,94	7,27	4,23	1,63
386,36	6,15	3,93	5,68
387,02	5,54	0,73	4,56
387,08	0,88	0,58	0,14
387,6	1,45	2,24	3,38
388,18	9,61	1,23	0,87
389,1	7,38	3,82	11,40
389,62	0,23	0,11	0,57
389,74	10,83	3,06	0,69
389,76	6,22	5,85	2,88
390,3	1,46	3,28	8,26
390,44	3,85	1,82	7,04
390,52	12,57	1,35	1,91
390,86	1,13	1,87	4,62
391,74	3,79	2,72	7,80
391,76	1,76	2,33	4,69
392,12	2,19	0,09	1,43
392,72	6,18	3,07	3,64
393,04	13,06	0,24	4,46
393,4	1,21	0,39	4,46
393,72	11,93	7,49	3,16
393,76	5,66	0,44	2,19
394,3	3,08	3,64	0,29
395,38	6,79	4,18	3,89
395,96	1,14	1,45	5,47
397,04	2,62	3,22	0,93
397,26	8,52	0,52	0,88
397,46	1,26	1,01	0,77
397,88	2,81	13,75	6,54
399,72	0,47	1,77	1,22
399,76	0,00	0,67	6,08
400,54	2,10	4,54	1,20
400,66	1,74	1,28	5,57
402,00	0,87	5,59	1,60

Резултатите од анализата претставуваат важна основа за стратешко планирање на активности за одржување, бидејќи просторната анализа:

- овозможува насочување на интервенциите кон делници со изразена деградација,
- поддржува поефикасна распределба на ресурси преку идентификација на најризичните делници од трасата,
- создава основа за понатамошна интеграција на податоците во кластер-анализа и модели за приоритизација на санации.

Најважно, идентификуваните повторувачки деградации претставуваат долгорочни проблеми, кои доколку не се решат навремено, можат да резултираат со развој на сериозни дефекти, намалување на безбедноста на сообраќајот и значително зголемување на трошоците за санација и одржување.

7.9.3. Интерпретација на системски и просторни резултати

Иако системската анализа (Слика 76) бележи општо подобрување на состојбата на трасата по 2019 година, со намалување на вредностите на TQI и стабилизирање на трендот, резултатите од просторната анализа (Слики 77 и 78) откриваат нерамномерна распределба на тоа подобрување. Имено, се идентификуваат делници со повторливи и континуирани деградации, особено во интервалот помеѓу km 394+000 и km 400+000, каде состојбата станува сè покритична во периодот 2022–2024. Ова значи дека, и покрај генералниот тренд на подобрување, одредени делници се изложени на засилена деградација, веројатно поради локални фактори како што се нестабилен долен строј, задоцнето интервентно одржување или конструктивни слабости. Затоа, овие делници треба да бидат вклучени во приоритетен план за санација, со можност за ревидирање на досегашните стратегии за нивно одржување и мониторинг.

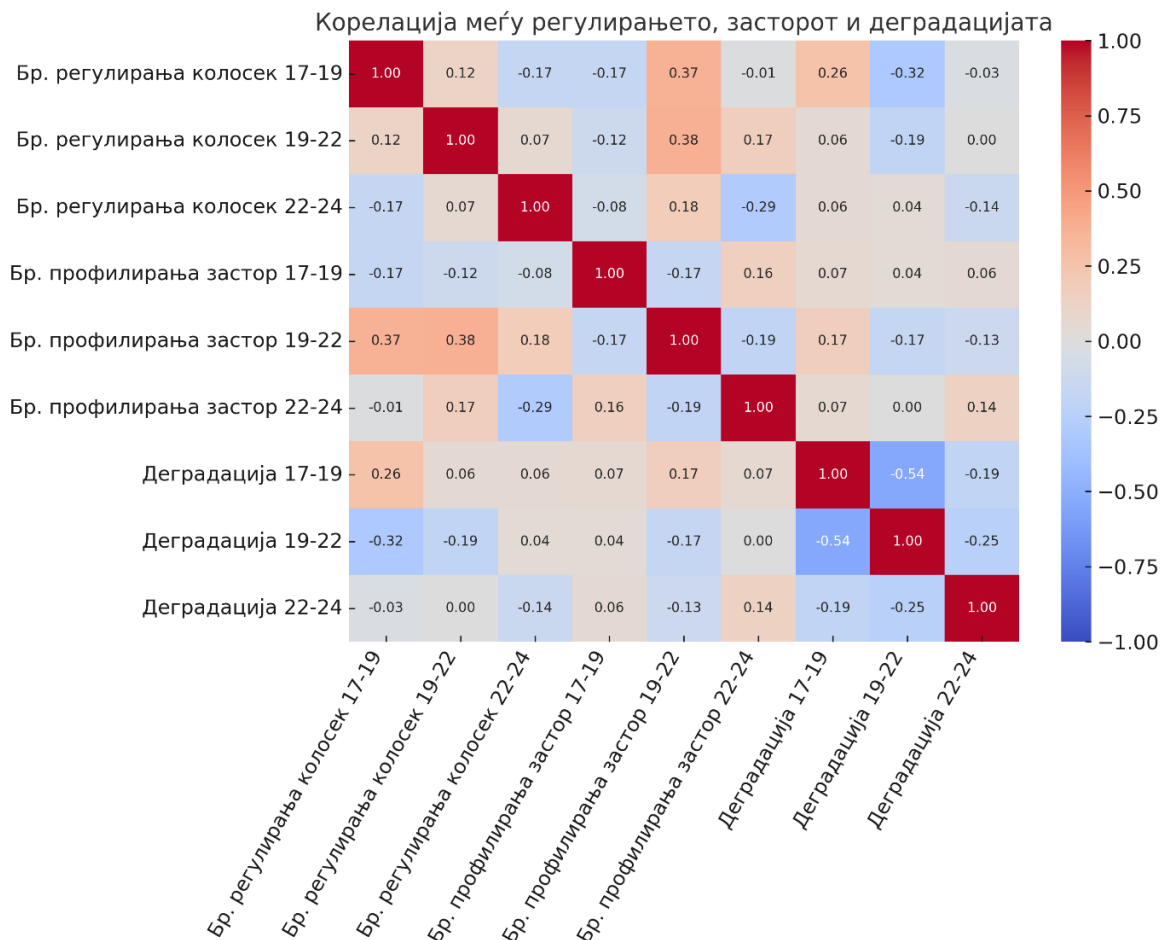
Во табелата 44 прикажана е паралелна споредба на резултатите од системската и просторната анализа, со цел да се разјаснат главните сличности и разлики, како и нивното значење во контекст на планирање на стратегии за одржување.

Табела 44. Споредба на системска и просторна анализа на деградацијата. (Извор: сопствени пресметки)

Анализа	Заклучок	Интерпретација	Одржување
Системска анализа	По 2019 се забележува промена од влошување кон подобрување (просечен TQI опаѓа со побавен тренд)	Генералната состојба на трасата покажува стабилизирање, што е веројатно поврзано со спроведените интервенции	Потврдува дека е извршено машинско регулирање со краткорочен ефект и делумен системски ефект
Просторна анализа	Делници околу 394–400 km и долж трасата 2022–2024 имаат повторлива континуирана деградација	Дел од трасата и натаму се карактеризира со нестабилни услови, и покрај генералното подобрување	Потребна е санација на долниот строј, засилени мерки за критичните делници и прилагодување на стратегијата за одржување

7.10. Анализа на влијанието на фреквенцијата на регулирање на колосекот врз неговата деградација

Анализата има за цел да го истражи односот помеѓу фреквенцијата на машински интервенции (регулирање на колосек и обликување на застор) и степенот на деградација на геометријата на колосекот. Стапката на деградација изразена е преку промената на TQI во трите разгледувани интервали: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024. За таа цел, пресметана е Пирсонова корелациска матрица, прикажана на Слика 80, која ги прикажува меѓусебните односи помеѓу бројот на извршени интервенции и соодветните вредности на ΔTQI по делници. Овој пристап овозможува идентификација на потенцијални врски меѓу фреквенцијата на одржувањето и трендовите на стабилизација или влошување на геометриската состојба.



Слика 79. Матрица на корелација меѓу бројот на регулирање на колосекот и обликувања на засторот и стапката на деградација во трите временски интервали. (Извор: Сопствени пресметки)

- Во периодот 2017–2019, бројот на активности за регулирање на колосекот покажува слаба позитивна корелација со деградацијата во истиот период ($r = 0.26$). Ова значи дека интервенциите главно се изведувале реактивно, односно насочени кон делници каде што веќе биле присутни геометриски нарушувања.
- Во периодот 2019–2022, бројот на машински интервенции реализирани во 2017–2019 има умерена негативна корелација со стапката на деградација ($r = -0.32$), што може да се толкува како задоцнет позитивен ефект, односно претходните активности за одржување веројатно придонеле за забавување на деградацијата во следниот интервал.
- Регулирањата на колосекот реализирани во периодите 2019–2022 и 2022–2024 имаат ниска корелација со стапката на деградација ($r \approx -0.19$ до 0.04). Ваквата слаба поврзаност значи дека интервенциите најчесто не се изведувале во согласност со реалните потреби на трасата, што резултира со намалена ефективност и ограничено влијание врз стабилизирање на геометриската состојба.
- Активностите за обликување на засторот во 2019–2022 покажуваат слаба позитивна поврзаност со деградацијата во сите три периоди ($r = 0.17$), што претставува нестандартен резултат. Ваквата поврзаност може да значи дека интервенциите се изведуваат како реакција на веќе постоечки дефекти, наместо

превентивно, што го ограничува нивниот долгорочен ефект врз стабилизирање на геометријата на колосекот.

- Податоците за обликување на засторот во 2022–2024 не покажуваат значајна поврзаност со ниту еден показател на деградација ($r < 0.15$). Овој резултат ја нагласува потребата за преоценка на планирањето на овие интервенции, со примена на критериуми засновани на реални мерења и технички индикатори за состојбата на трасата.
- Забележливо е и дека обликувањето на засторот во 2017–2019 имаат слабо негативна или занемарлива поврзаност со подоцнежната деградација. Најверојатна причина е тоа што интервенциите не биле изведени на делниците и во периодите кога започнала реалната појава на геометриски деградации. Со тоа, делници од трасата не биле опфатени со активности за одржување, токму во критични фази на влошување на геометриската состојба, што ја ограничува нивната долгорочна ефикасност.

Врз основа на спроведените квантитативни анализи и детектираните просторни и временски обрасци на деградација на колосекот, се формулирани наведените заклучоци и препораки. Целта е да се унапреди стратегијата за машинско одржување преку таргетирање, аналитички поткрепени интервенции, насочени кон зголемување на долгорочната стабилност и намалување на трошоците за санација.

- Бројот на регулирања на колосекот покажува највисоко ниво на поврзаност со степенот на деградација, особено кога се анализираат интервали кои овозможуваат проценка на одложен ефект. Позитивното влијание од машинските интервенции најчесто не се појавува веднаш, туку станува забележливо во следниот временски период. Затоа, при планирање на циклусите на машинско одржување, важно е да се земе предвид оваа временска зависност.
- Машинското планирање и обликување на засторната призма не покажуваат стабилна ниту статистички значајна поврзаност со параметрите на деградација. Ваквите резултати упатуваат на ограничена ефикасност на овие интервенции, особено кога се применуваат како самостојна мерка без дополнителна санација. Затоа, потребно е критичко преиспитување на критериумите врз кои се базира нивното планирање, со цел да се обезбеди поголема усогласеност со реалните инженерски потреби на трасата.
- Потребно е темелно преиспитување на критериумите за планирање на интервенции, со премин од реактивен кон превентивен модел на одржување. Кај интервенциите на засторот, ефективноста во голема мера зависи од тоа дали се спроведени во соодветен временски момент, односно пред да се манифестираат посериозни деградации. Затоа, системите за мониторинг треба да обезбедат редовно и систематско следење на индексот на квалитет на колосекот (TQI), како основен индикатор за тековната состојба на колосекот. Ова ќе овозможи поефикасна приоритизација, оптимално користење на ресурси и навремено планирање на интервенциите, врз основа на реалната состојба на колосекот.

7.10.1. Регресиона анализа, влијание на бројот на активности за подбивање врз деградацијата на колосекот

За секој од разгледуваните периоди (2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024) спроведена е посебна повеќекратна регресиона анализа со цел да се испита влијанието на бројот на интервенции за регулирање на колосекот и профилирање на засторот врз стапката на

деградација. Во моделот се вклучени и интервенциите изведени во истиот период, како и оние што му претходеа или следеле, со цел да се идентификуваат евентуални одложени ефекти од машинското одржување.

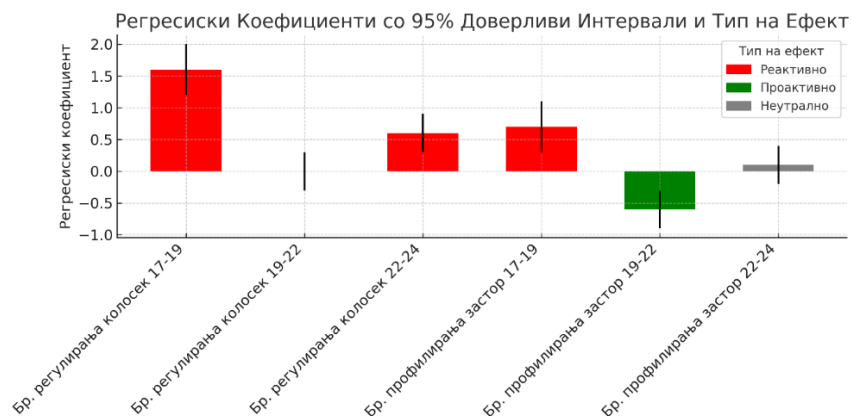
Во табелата подолу прикажани се само оние фактори кај кои е утврдена статистички значајна поврзаност со стапката на деградација, при ниво на значајност $p < 0.05$. Овој праг е општо прифатен во статистичката анализа, бидејќи обезбедува разумна рамнотежа помеѓу чувствителноста на тестот и ризикот од донесување погрешни заклучоци, дозволувајќи најмногу 5% веројатност добиената поврзаност да биде резултат на случајност.

Табела 45. Значајни резултати од повеќекратна регресионска анализа за врската помеѓу бројот на интервенции и стапката на деградација. (Извор: Сопствени пресметки)

Период	Фактор	Коефициент	P-вредност
Деградација 17–19	Бр. подбивања колосек 17–19	1.667	< 0.001
Деградација 17–19	Бр. подбивања колосек 22–24	0.617	0.021
Деградација 22–24	Бр. обликување застор 19–22	-0.728	0.026
Деградација 22–24	Бр. обликување застор 22–24	0.391	0.027

Регресионите коефициенти го прикажуваат правецот и јачината на влијанието: позитивна вредност значи дека зголемувањето на бројот на интервенции е поврзано со зголемена стапка на деградација, што најчесто се поврзува со реактивно одржување, односно интервенции изведени на делници кај кои деградацијата веќе била присутна. Спротивно на тоа, негативен коефициент означува дека интервенцијата придонела за намалување на деградацијата, што претставува индикатор за навремена, превентивна или успешно спроведена мерка.

Покрај табеларниот приказ, на следниот график се прикажани регресионите коефициенти за секој анализиран период, заедно со 95% интервали на доверба. Ефектите се класифицирани како реактивни, проактивни или неутрални и се означени со соодветни бои, црвена, зелена и сива, со цел да се прикаже влијанието на интервенциите врз стапката на деградација, во зависност од моментот и ефектот на нивната примена. Овој визуелен приказ прави јасна разлика меѓу интервенции што се спроведуваат во услови на веќе нарушена геометриска состојба и оние што придонесуваат за стабилизација или превенција на понатамошно деградирање.



Слика 80. Регресиони коефициенти со 95% доверливи интервали и тип на ефект, за интервенции во различни периоди и нивната врска со стапката на деградација. (Извор: Сопствени пресметки)

Како што е прикажано на Слика 80, регресионите коефициенти ја отсликуваат насоката и интензитетот на влијанието на секој тип интервенција врз стапката на деградација. Интервенциите за регулирање на колосекот во периодот 2017–2019 се издвојуваат со висока позитивна вредност на коефициентот, што потврдува реактивен карактер, односно, интервенциите се изведувале по веќе настаната деградација. За истиот тип интервенции во 2019–2022, ефектот е негативен, но со поширок интервал на доверба, што сигнализира варијабилност во резултатите и ограничена сигурност во стабилноста на ефектот.

Најјасен позитивен ефект врз намалување на деградацијата е забележан кај планирање и обликување на засторот реализирани во периодот 2019–2022, при што регресиониот коефициент е негативен и статистички значаен, со 95% интервал на доверба, што потврдува стабилно и доследно влијание во насока на подобрување на состојбата во наредниот период (2022–2024).

За одредени интервенции, интервалот на доверба на регресионите коефициенти ја опфаќа нултата вредност, што значи дека нивното влијание врз деградацијата не може со сигурност да се потврди. Со други зборови, не постои доволно статистички доказ дека тие интервенции довеле до подобрување или влошување на состојбата. Ваквиот резултат укажува на потреба интервенциите да се планираат врз основа на податоци и детална анализа на состојбата по делници, за да се обезбеди реален ефект врз стабилизирање на геометријата на колосекот.

Согласно добиените резултати, може да се заклучи дека интервенциите за регулирање на колосекот имаат изразен ефект врз стапката на деградација кога се изведуват откако веќе се појавила нарушена состојба на трасата, што ја одразува нивната реактивна природа. Наспроти тоа, интервенциите спроведени навремено не покажуваат доволно изразен превентивен ефект или статистичка значајност. Поради тоа, потребно е дополнително моделирање со цел да се процени дали ефектот се манифестира со одложување, односно, во периодот по реализацијата.

Податоците покажуваат дека интервенциите за обликување на засторот имаат стабилен ефект врз намалување на деградацијата кога се применуваат пред почетокот на поинтензивна фаза на влошување. Најдобри резултати се постигнуваат кога интервенциите се изведуват додека вредностите на индексот на квалитет (TQI) сè уште се во прифатливи граници. Таквиот пристап придонесува за спречување на понатамошно деградирање и за зголемување на ефективноста на одржувањето.

Иако анализата води до вредни и статистички значајни резултати, таа, како и секоја емпириска студија, се соочува со одредени методолошки ограничувања. Тие вклучуваат ограничен број на набљудувања, потенцијална мултиколинearност меѓу променливите и неможност за целосно изолирање на надворешни влијанија како што се климатски услови, тип на долен строј и интензитет на сообраќај. Овие фактори не ја компромитираат валидноста на резултатите, но ја нагласуваат потребата за дополнителни истражувања со пообемни и поразновидни бази на податоци, како и примена на поробусни модели за потврда на добиените зависности.

Иако слични методолошки пристапи се обработени во поновата литература, дистинкцијата помеѓу ефектите од интервенциите на колосекот и на засторот како одвоени компоненти сè уште ретко се разгледува детално. Овој труд нуди нов и практично применлив придонес во таа насока, со можност за интеграција во националните практики за

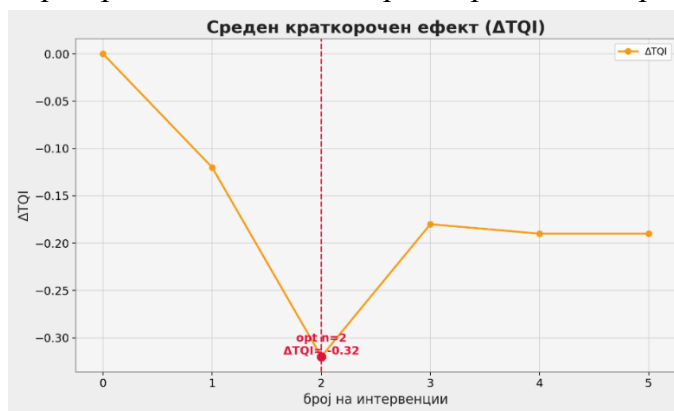
планирање и управување со активности за одржување. Добиените резултати ќе послужат како основа за развој на модел за класификација и оптимизација на машински интервенции, кој ќе се темели на анализирани обрасци на деградација и историски реализирани мерки.

7.11. Оптимизација на бројот на интервенции

Во согласност со претходно опишаната методологија, спроведена е анализа на краткорочниот и долгорочниот ефект од различен број интервенции за машинско регулирање на колосекот. Анализата ги опфаќа трите последователни временски интервали: 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024. Резултатите се агрегирани врз основа на симулирани вредности добиени преку Random Forest модели. Визуелната презентација на резултатите е извршена преку линии на тренд, при што се означени и оптималните точки на интервенција, односно број на активности за машинско одржување што доведуваат до најниска очекувана деградација во дадениот период.

7.11.1. Краткорочен ефект – просек по сите периоди

На слика 81 прикажан е просечниот краткорочен ефект од интервенциите, дефиниран како промена на вредноста на индексот на квалитет на колосекот (ΔTQI) веднаш по извршеното регулирање на колосекот. Вредноста е изразена како разлика помеѓу TQI пред и по интервенцијата, агрегирано за сите анализирани временски периоди.



Слика 81. Среден краткорочен ефект на интервенциите врз ΔTQI . (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)

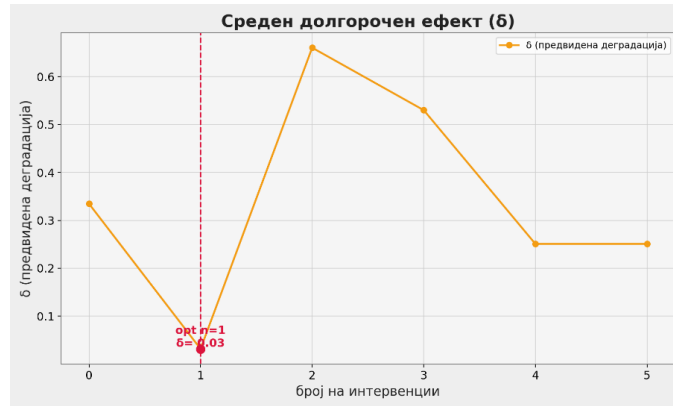
Најголемо подобрување на геометријата е добиено при две изведени интервенции, каде просечната промена изнесува $\Delta TQI \approx -0.32$, што претставува оптимален краткорочен ефект ($n_1 = 2$). Негативната вредност на ΔTQI означува намалување на индексот, односно подобрување на геометриската состојба на колосекот.

По втората интервенција кривата преминува во плато-зона со минимални или намалени придобивки, што означува дека е постигната состојба на заситеност. Дополнителните интервенции немаат видливо влијание врз квалитетот на колосекот и во одредени случаи можат да доведат до нарушување на стабилноста на засторот и долниот строј.

Оптималната вредност $n_1 = 2$ претставува граница по која понатамошните активности немаат значаен позитивен ефект врз подобрувањето на TQI . Овој резултат е важен за дефинирање на рационален пристап при планирањето на машинските интервенции, каде што се обезбедува најдобар сооднос меѓу добиеното подобрување и зачувувањето на долниот строј.

7.11.2. Долгорочен ефект – просек по сите периоди

На слика 82 прикажан е просечниот долгорочен ефект од интервенциите, изразен преку стапката на деградација δ на индексот на квалитет на колосекот (TQI), агрегирана за сите анализирани временски периоди. Параметарот δ ја претставува динамиката на влошување на геометријата на колосекот меѓу две последователни интервенции и служи како индикатор за долгорочната стабилност на трасата.



Слика 82. Среден долгорочен ефект на интервенциите врз ΔTQI . (Извор: Сопствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)

Најповолен резултат добиен е при една изведена интервенција, со просечна стапка на деградација $\delta \approx 0.06$. Оваа вредност претставува оптимален долгорочен ефект ($n_2 = 1$), односно состојба во која се постигнува најбавна кумулативна деградација на геометријата. Зголемувањето на бројот на интервенции над оваа граница резултира со повисоки δ -вредности, што значи побрзо влошување на состојбата на колосекот во подолг временски интервал.

По првата интервенција, кривата добива растечки карактер, што значи дека со зголемување на бројот на интервенции ефектот на подобрување се намалува. Во овој интервал придобивките стануваат минимални, а процесот преминува во состојба на заситеност. Прекумерната фреквенција на регулирање доведува до акумулирање на пластични деформации во засторот и постепено нарушување на рамнотежата на долниот строј. Наместо стабилизација, се јавува тенденција на побрзо повторно влошување на геометријата, што ја ограничува долгорочната ефикасност на интервенциите, особено кога се изведуваат во кратки временски интервали.

Во споредба со краткорочниот ефект (Слика 89), каде најдобар резултат се постигнува со две интервенции, кај долгорочниот ефект доминира спротивен тренд, стабилноста се одржува со помал број активности. Оваа разлика произлегува од различната природа на процесите: краткорочниот ефект претставува непосредно подобрување на геометријата, додека долгорочниот се развива преку акумулирани реакции на подлогата и засторот низ подолг временски период.

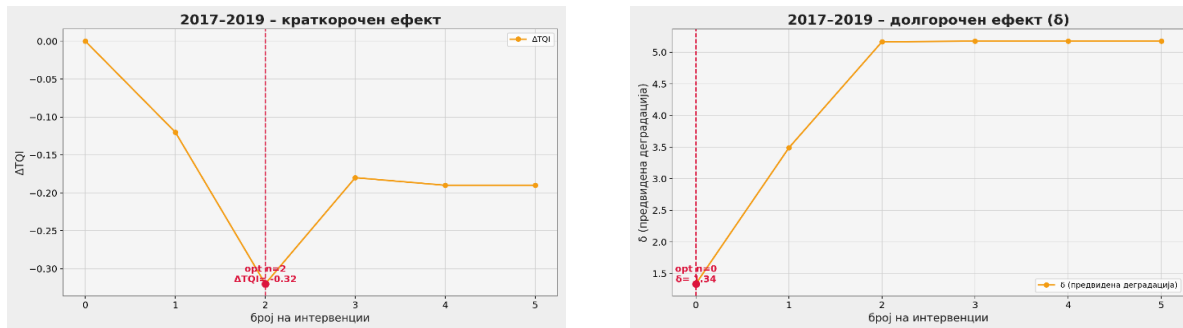
Оптималната вредност $n_2 = 1$ претставува граница по која дополнителните интервенции не носат значајни придобивки и можат да доведат до губење на долгорочната стабилност. Рамнотежата меѓу обновата на геометријата и зачувувањето на долниот строј се постигнува со рационално планирање на машинските активности и со поголеми временски интервали меѓу интервенциите.

7.11.3. Анализа на ефекти по временски интервали

Резултатите за секој од трите временски периоди (2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024) се прикажани на слики 83 до 85. За секој интервал е извршена одделна визуелизација на ефектот од интервенциите на регулирање на колосекот, со прикажани краткорочен (ΔTQI) и долгорочен ефект (δ). На графици се означени оптималните точки на интервенции (n_1 и n_2), при кои се постигнува највисока ефикасност на изведените активности.

- Период 2017 – 2019 година

Највисокиот краткорочен ефект е постигнат при две интервенции ($\Delta TQI \approx -0.32$), што претставува оптимален број на активности за постигнување на најголемо непосредно подобрување на геометријата на колосекот. По оваа точка се забележува намалување на ефектот, што укажува дека дополнителните интервенции не носат значително подобрување.

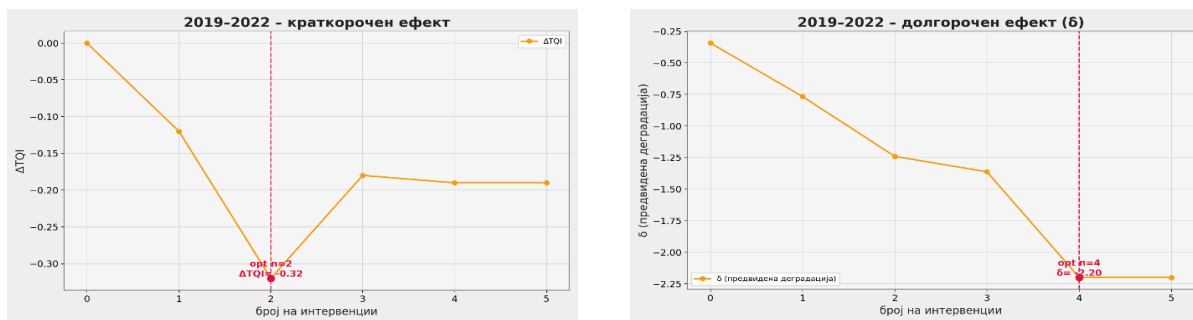


Слика 83. Краткорочен и долгорочен ефект на интервенции за периодот 2017–2019 година. (Извор: Собствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)

Од аспект на долгорочната стабилност, најповолна состојба е добиена при нула интервенции ($\delta \approx 1.52$), што покажува дека отсуството на дополнителни тампонирања доведува до најбавна предвидена деградација на TQI. Овој резултат потврдува дека прекумерното интервенирање во овој период може да има контраефект, односно да го забрза процесот на долгорочно влошување на колосекот.

- Период 2019 – 2022 година

Највисокиот краткорочен ефект постигнат е при две интервенции ($\Delta TQI \approx -0.32$). Оваа вредност претставува најголемо непосредно подобрување на геометријата на колосекот во рамки на трогодишниот период. По изведување на две машински активности, ефектот се стабилизира, а дополнителните интервенции не доведуваат до значајно подобрување на TQI. Резултатите ја прикажуваат границата по која позитивниот ефект од нови интервенции станува минимален.

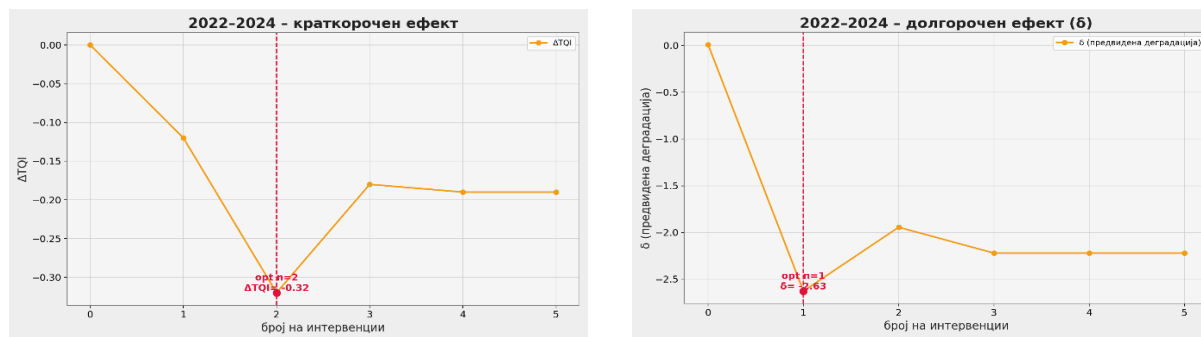


Слика 84. Краткорочен и долгорочен ефект на интервенции за периодот 2019–2022 година. (Извор: Собствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)

Во поглед на долгорочната стабилност, најповолна состојба добиена е при четири интервенции ($\delta \approx -2.06$). Поголем број активности во овој случај овозможуваат најбавна предвидена деградација на TQI. Во овој временски интервал, колосекот имал зголемена потреба од почести механички активности, најверојатно поради акумулирани структурни слабости и повисок сообраќаен интензитет.

- Период 2022 – 2024 година

Највисокиот краткорочен ефект добиен е при две интервенции ($\Delta TQI \approx -0.32$). Во оваа точка е постигнато најголемо непосредно подобрување на геометријата на колосекот во рамки на анализираниот период. По изведување на две активности, резултатите се стабилизираат, а понатамошните интервенции не доведуваат до дополнителен напредок на TQI.



Слика 85. Краткорочен и долгорочен ефект на интервенции за периодот 2022–2024 година. (Извор: Собствени пресметки врз основа на податоци од мерења и активности на машинско подбивање.)

Во поглед на долгорочниот ефект, најповолна состојба е постигната при три интервенции ($\delta \approx -2.86$). Оваа конфигурација претставува најниска вредност на предвидена деградација и најдобар сооднос меѓу бројот на активности и одржувањето на геометрискиот квалитет. Во рамки на периодот 2022–2024 се забележува постепено преместување на оптималната точка кон поголем број интервенции, што е поврзано со потребата за почесто одржување на колосекот поради зголемен интензитет на оптоварување и акумулирано влијание од претходните циклуси.

Во сите три анализирани интервали, краткорочниот оптимум се задржува при две интервенции, со приближно иста вредност на подобрување ($\Delta TQI \approx -0.32$). Овој резултат укажува на стабилен однос меѓу бројот на машински активности и непосредниот ефект врз геометријата на колосекот, без значајни промени низ времето.

Долгорочниот ефект, напротив, покажува постепено поместување на оптималната вредност: од нула интервенции во периодот 2017–2019, кон четири интервенции во 2019–2022, и три интервенции во 2022–2024 година. Овој тренд укажува на постепено зголемување на потребата од механичко одржување, што е во согласност со стареењето на инфраструктурата, зголемениот сообраќаен товар и акумулираните структурни слабости на колосекот.

Во целина, добиените резултати потврдуваат дека оптималниот број интервенции не е фиксен параметар, туку зависи од состојбата на колосекот и динамиката на неговата деградација низ годините. Соодветната рамнотежа меѓу краткорочниот и долгорочниот ефект претставува клучен предуслов за ефикасно планирање на одржувањето..

7.11.4. Анализа на ефектот од бројот на интервенции врз долгорочната стапка на деградација

Со анализата е извршена проценка на долгорочниот ефект од различен број машински интервенции врз стапката на деградација на индексот на квалитет на колосекот (TQI). Проценетите вредности се добиени со примена на Random Forest модели и ги претставуваат просечните вредности за сите анализирани временски интервали (2017–2024). На тој начин е овозможено да се прикаже усреднета зависност помеѓу интензитетот на одржување (бројот на интервенции) и просечната долгорочна стабилност на колосекот.

Анализата го опфаќа интервалот од 0 до 5 интервенции по временски циклус, што овозможува целосна проценка на влијанието од минимален, умерен и интензивен режим на машинско регулирање. Секоја вредност во табелата претставува просечна долгорочна промена на TQI во зависност од бројот на интервенции во дадениот четиригодишен период, пресметана како просек од сите делници на трасата.

Табела 46. Проценети вредности на долгорочна деградација на TQI во функција од бројот на машински интервенции (Извор: Сопствени пресметки врз основа на анализата на ΔTQI за периодот 2017 – 2024).

Број на интервенции	деградација
0	-0.28
1	0.29
2	-0.67
3	-0.59
4	-0.05
5	-0.05

Резултатите прикажуваат јасна нелинеарна зависност меѓу бројот на изведени интервенции и нивниот долгорочен ефект.

- При отсуство на интервенции ($n = 0$) се забележува највисока стапка на деградација, што означува континуирано влошување на геометријата без механичко регулирање.
- При една интервенција ($n = 1$), вредноста на δ_n преминува во позитивна вредност (0.29), што значи почетна стабилизација и делумно ублажување на процесот на деградација.
- Најниски вредности на δ_n се постигнуваат при две до три интервенции ($n = 2-3$), кога просечната деградација се движи околу $\delta \approx -0.6$. Овој интервал ја претставува оптималната зона на техничка ефикасност, во која машинското регулирање има најдобар долгорочен ефект врз одржување на геометријата.

По оваа граница ($n \geq 4$), ефектот на дополнителни активности се намалува и се стабилизира околу нулта вредност, што ја означува точката на заситеност. Во оваа состојба, секоја нова интервенција има сè помало влијание врз долгорочната стабилност. Причината е тоа што прекумерните интервенции доведуваат до повторливо разместување на засторните зрна, губење на компактираноста и акумулирање на пластични деформации.

Оваа појава покажува дека прекумерната механичка обработка на засторот не го подобрува квалитетот на геометријата на трасата, туку може да доведе до структурен замор и нарушување на рамнотежата на долниот строј. Затоа, активностите за одржување со над три интервенции не придонесуваат кон дополнителна стабилност, а водат кон зголемени оперативни трошоци и побрза повторна појава на дефекти.

Врз основа на прикажаните вредности, може да се издвојат следни заклучоци:

- $n = 2$ претставува компромисна вредност, при која се постигнува најдобар сооднос меѓу геометриската стабилност и економската оправданост;
- $n \geq 3$ не резултира со дополнително подобрување на TQI, што претставува граница на рационално одржување и индикатор за оптимална фреквенција на машинско регулирање.

Со анализата се дефинира технички и економски оправдана стратегија за одржување, во која бројот на интервенции не се заснова на фиксен распоред, туку на реално предвидена реакција на колосекот. Ваквиот пристап овозможува прецизно прецизирање на активностите, избегнување на непотребни трошоци и зачувување на долгорочната стабилност на системот.

8. ДИСКУСИЈА ЗА ДОБЕИНТИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО

По деталната евалуација на моделите во Глава 7, во ова поглавје се врши нивно поврзување и инженерска интерпретација во контекст на реалното однесување на анализираната железничка инфраструктура на делницата Колашин – Подгорица. Коментарите ги разгледуваат резултатите не само од аспект на статистичката точност, туку и од нивната применливост во праксата за одржување на колосекот и управувањето со деградацијата на геометријата.

Во ова поглавје се анализираат трите главни групи на модели, статистички, машински и композитни модели за деградација, со цел да се согледа нивната релативна ефикасност, способност за интерпретација и инженерска употребливост. Притоа, дискусијата се фокусира на тоа кои модели најуспешно ги опишуваат забележаните трендови на TQI и како секој пристап се рефлектира во однос на реалните услови на колосекот и машинските интервенции.

Дополнително, во ова поглавје се анализира поврзаноста помеѓу теоретските претпоставки на моделите и реалните податоци, како и границите на нивната примена. Поради комплексноста на влијателните фактори, како што се геометриските карактеристики, староста на горниот stroj и бројот на машински интервенции, резултатите бараат детална инженерска интерпретација, при што се оценува и практичната вредност на секој модел во поддршката на процесите за одржување.

Конечно, поглавјето ја има и улогата да понуди критички осврт на методологијата, при што се идентификуваат предностите, ограничувањата и можните насоки за понатамошно унапредување на моделите и пристапот кон анализа на деградацијата на колосекот.

8.1. Споредбена анализа на сите модели за предвидување

Резултатите од изведените модели овозможуваат сеопфатна проценка на способноста за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) и подобро разбирање на механизмите за неговата деградација на анализираната делницата Колашин – Подгорица. Применетите статистички и машински методи имаат различни нивоа на точност, стабилност и интерпретабилност, што овозможува јасна проценка на нивната инженерска употребливост.

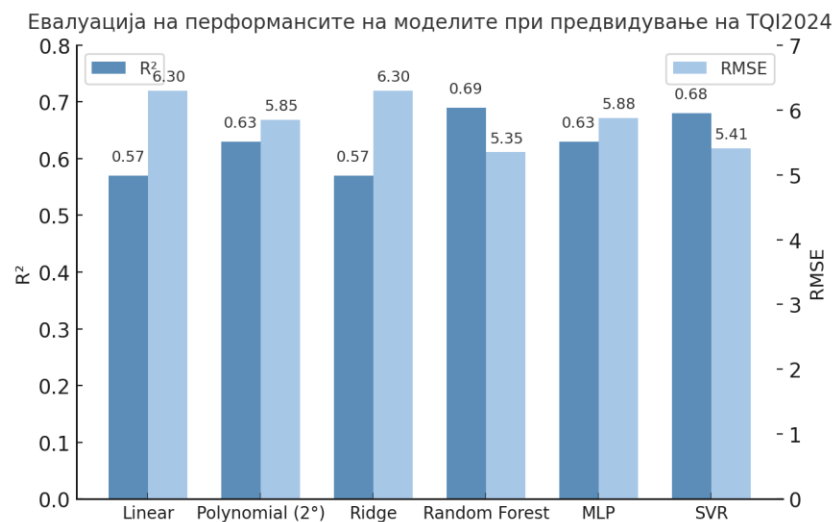
Во групата статистички модели (линеарна регресиона анализа, полиномиална и Тихонова регуларизација - ridge regression) се забележува постепено зголемување на точноста при премин од линеарен кон полиномен модел. Линеарната регресија има стабилен, но ограничен интервал за опишување на сложени и нелинеарни процеси, особено на делници со комплексна геометрија. Полиномниот модел овозможува подобро прилагодување кон реалните податоци и појасно ги моделира постепениот промени на стапката на деградација. Ridge регресијата придонесува за стабилни коефициенти во услови на висока меѓузависност меѓу влијателните променливи.

Кај моделите на машинско учење (Random Forest, SVR и MLP) се постигнува повисока предвидувачка способност и поефикасно опфаќање на нелинеарни и интерактивни односи. Random Forest обезбедува најдобар баланс меѓу точност и стабилност и овозможува процена на важноста на влезните променливи. SVR дава добра точност, но со ограничена транспарентност за инженерска интерпретација. MLP може да постигне многу висока

точност при соодветно подесување, но поради ограничена интерпретабилност и сложена внатрешна структура бара внимателна контрола и валидација.

Табела 47. Статистички мерки за евалуација на моделите за предвидување. (Извор: Сопствени пресметки)

Модел	R^2	MAE	RMSE
Линеарна регресија	0.57	4.68	6.30
Полиноминална регресија	0.63	4.42	5.85
Ridge регресија	0.57	4.68	6.30
Random Forest	0.69	4.13	5.35
Multilayer Perceptron (MLP)	0.63	4.39	5.88
Support Vector Regression (SVR)	0.68	4.54	6.01



Слика 86. Споредба на вредностите на коефициентот на детерминација (R^2) и средната квадратна грешка (RMSE) за сите модели на предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI). (Извор: Авторска обработка врз основа на резултатите од анализата.)

Графичкиот приказ на слика 86 дава директна споредба меѓу точноста и просечната грешка на моделите. Моделите на машинско учење (Random Forest, SVR и MLP) постигнуваат повисоки вредности на R^2 и пониски RMSE во однос на статистичките модели, што значи подобро пресликување на нелинеарната природа на деградацијата. Random Forest има највисок R^2 и најнизок RMSE, што создава најповолна рамнотежа меѓу точност и стабилност. MLP и полиномилниот модел се на слично ниво по R^2 , но со нешто поголема грешка, додека линеарната и ridge регресијата, иако интерпретабилни, заостануваат поради повисок RMSE.

Random Forest моделот е соодветен за оперативно предвидување и приоритизација на интервенции, а полиномилниот модел е корисен за аналитичко објаснување на факторите на деградација. Комбинацијата од двата пристапа обезбедува и транспарентност и висока предвидувачка моќ, корисна основа за планирање и управување со одржувањето на железничката инфраструктура.

8.2. Деградација на колосекот и ефект на машинските интервенции

Синтетичкиот преглед на вредностите на ΔTQI за периодите 2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024 овозможува да се согледа долгорочниот развој на состојбата на колосекот и

постепената трансформација на колосекот од фаза на зголемена динамика на деградација кон порамномерна и стабилна состојба.

Во периодот 2017–2019 се забележува поизразена деградација на геометријата на колосекот. Овој тренд се поврзува со состојба на колосекот по спроведени активности за одржување во претходните години, кога засторот и долниот строј сè уште не биле целосно стабилизирани. Во такви услови, вертикалните и хоризонталните напрегања се пренесуваат нерамномерно, што доведува до побрзо влошување на геометријата. Во наредниот период, 2019–2022, се забележува постепено намалување на интензитетот на деградацијата како резултат на природната консолидација на засторот и подобрената распределба на оптоварувањата. Во најновиот интервал, 2022–2024, процесот на деградација не се одвива рамномерно: одредени делници задржуваат стабилна состојба, додека други повторно покажуваат зголемени ΔTQI вредности. Овие разлики се резултат на локални геотехнички услови, различна носивост на долниот строј и нееднакво влијание од сообраќајното оптоварување и одржувањето.

Анализата на делниците со највисока просечна стапка на деградација за периодот 2017–2024 покажува просторна групираниост во интервалот од приближно km 394 до km 399. Овие локации се карактеризирани со континуирано зголемување на ΔTQI и циклично повторување на влошувањето по секоја интервенција. Најчесто се наоѓаат во близина на мостови, тунели и станици, каде што влијанието на динамичките сили и променливите услови на долниот строј (подлогата) создаваат постојани микропоместувања. Поради тоа, овие делници бараат интервенции насочени кон подобрување на одводнувањето, зголемување на носивоста на подлогата и засилување на конструктивната стабилност на колосекот. Таквите мерки можат да опфатат прочистување и уредување на одводните канали, дополнување или обновување на слоевите под засторот со материјали со подобри механички својства, како и локални зајакнувања на колосекот во зоните со нерамномерни слегнувања или зголемено динамичко оптоварување.

Системската анализа заснована на парцијална линеарна регресија ја открива 2019 година како преломна точка во трендот на деградацијата. Пред оваа година, просечниот TQI бележи пораст, што означува влошување на геометријата, додека по 2019 година наклонот на трендот преминува во негативна вредност, што означува успорување на процесот. Овој преод го одразува влијанието на изведените интервенции и постепената адаптација на колосекот кон експлоатационите оптоварувања. Иако интервенциите доведуваат до подобрување, тоа не претставува враќање во првобитна состојба, туку создавање на нова рамнотежа со понизок наклон на деградација.

Според резултатите од корелационите и регресионите анализи, одржувањето во најголем дел се спроведува реактивно, односно активностите најчесто се реализираат по настаната деградација, наместо превентивно, пред појавата на геометриски нарушувања. Во првиот период, бројот на интервенции е најголем токму на делниците каде што деградацијата е веќе изразена, што ја ограничува долгорочната ефективност. Во следните години, дел од интервенциите имаат позитивен ефект со одложено дејство, особено кај обликувањето на засторот спроведено пред интензивна фаза на влошување. Таквиот резултат покажува дека ефектот од машинските активности е најсилен кога тие се темпирани навремено, пред критичниот момент на раст на ΔTQI . Од друга страна, повторените регулирања без паралелно подобрување на долниот строј водат кон губење на стабилноста и појава на заситување, при што секоја наредна интервенција има сè помал ефект.

Сумирано, интервенциите создаваат привремено подобрување, потоа следи период на забрзано влошување и постепена стабилизација на ново ниво. Затоа, одржувањето не треба да се сфаќа како средство за враќање на колосекот во „нова“ состојба, туку како механизам за управување со брзината на деградација. Целта не е максимално намалување на TQI во моментот на интервенција, туку постигнување стабилен и долгорочно одржлив тренд со умерени промени.

Најчувствителните делници, особено во интервалот помеѓу km 394 и km 400, бараат дополнителна инженерска анализа на состојбата и носивоста на долниот строј, како и примена на мерки што ќе ја зголемат стабилноста на колосекот и ќе го ограничат нерамномерното слегнување. Притоа е препорачливо редукација на чисто геометриските регулирања на колосекот и насочување кон поправки што го засилуваат долниот строј и го подобруваат одводнувањето. За останатиот дел од трасата, оптимална стратегија е комбинација од превентивни активности за профилирање на засторот и селективно регулирање на геометријата на колосекот, при што интервенциите треба да се планираат според трендовите на ΔTQI и степенот на одложен ефект.

Резултатите потврдуваат дека најдобри ефекти се постигнуваат кога активностите се темпирани во фаза на умерено влошување, додека засторот сè уште има стабилна структура. Таквиот пристап овозможува забавување на деградацијата, намалување на потребата од повторни интервенции и подолгорочна стабилност на геометријата. Стратегијата за одржување на анализираната траса на пругата Колашин – Подгорица треба да се заснова на комбинација од континуиран мониторинг, анализа на трендови и рационално темпирање на интервенциите, со што ќе се обезбеди стабилен квалитет на колосекот и поефикасно користење на ресурсите.

8.3. Оптимален број и фреквенција на машински интервенции

Резултатите од спроведените анализи за различни периоди (2017–2019, 2019–2022 и 2022–2024) покажуваат дека ефикасноста на машинското регулирање на колосекот не е линеарна и зависи од бројот на изведени интервенции, временскиот интервал меѓу нив и состојбата на долниот строј.

- Краткорочен ефект (ΔTQI)

Непосредниот ефект од машинските интервенции расте до одредена граница, по што системот преминува во зона со намалена ефикасност. Најголемо подобрување се постигнува при две интервенции во двегодишен период, по што дополнителните активности не носат значајно подобрување на геометријата. По неколку последователни интервенции ефектот слабее, бидејќи засторот ја достигнува границата на компактност и не може понатаму да обезбеди стабилна геометрија.

Овој резултат има практично значење при планирање на одржувањето: првите интервенции даваат најголем ефект, но по втората се постигнува граница на ефикасност, кога засторот веќе не може да се набие со ист интензитет и дополнителните активности имаат минимален придонес.

- Долгорочен ефект (δ)

Долгорочните резултати ја отсликуваат динамиката на деградацијата на TQI во подолг временски интервал и го дефинираат балансот меѓу зачестеноста на интервенциите и стабилноста на системот.

Најповолната стабилност е постигната при една интервенција во двегодишен циклус, што ја претставува границата на рационално одржување, доволно честа за да спречи акумулирање на деформации, но не толку фреквентна што би довела до нарушување на структурата на засторот.

При поголем број интервенции, долгорочната стабилност опаѓа, што се должи на повторливото механичко влијание кое ја менува компактната на засторот и создава услови за побрза повторна деградација.

Прекумерното регулирање не ја зголемува долгорочната потребна геометрија на колосекот, туку создава услови за структурен замор и постепена нестабилност на долниот строј.

- Рамнотежа меѓу краткорочен и долгорочен ефект

Анализата на краткорочниот и долгорочниот ефект покажува дека оптималната фреквенција на машинско регулирање е една до две интервенции во двегодишен период.

Овој интервал претставува компромисна зона, во која се постигнува најдобар однос меѓу непосредното подобрување на геометријата и зачувувањето на долгорочната стабилност.

Во инженерска смисла, тоа значи дека интервенциите се изведуваат доволно често за да се одржи функционалната состојба на колосекот, но не толку често што би го нарушиле природниот процес на стабилизација на засторот. На подолги интервали од две години се појавува натрупување на дефекти и побрзо зголемување на TQI, додека при пречести активности системот ја губи еластичноста и рамнотежата.

- Симулирани резултати и точка на заситеност

Симулациите со Random Forest моделот ја потврдуваат зависноста помеѓу бројот на интервенции и долгорочната стабилност.

Резултатите од grid-search анализата прикажуваат изразен минимум на деградација при две интервенции, по што ефектот се стабилизира и не носи дополнително подобрување.

Оваа зона претставува точка на заситеност, кога влијанието од нови активности е исцрпено, а системот реагира со минимални придобивки или дури со забрзана деградација. Таквата состојба е типична за застор кој е повеќекратно обработуван и ја изгубил првичната носивост. Прекумерните интервенции не ја подобруваат стабилноста, туку ја намалуваат кохезијата на грануларната структура и ја зголемуваат чувствителноста на повторно оптоварување.

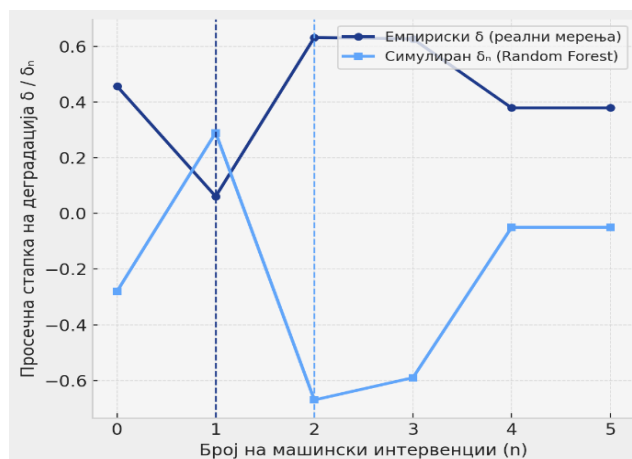
- Споредба на емпириски и симулирани трендови

Споредбата меѓу емпириските δ и симулираните δ_n вредности покажува дека двата пристапа ја следат истата општа тенденција, но со различна амплитуда.

Емпириските резултати ја отсликуваат реалната варијабилност на системот, вклучувајќи локални геотехнички и хидролошки влијанија, додека моделските резултати претставуваат усреднет одговор на трасата под стандардизирани услови.

Разликата меѓу двете криви најмногу се јавува во зоната на две до три интервенции, каде во реалните податоци се забележува зголемена нестабилност, а моделот ја претставува стабилизацијата како просечен случај.

Оваа разлика покажува дека моделот ја опишува долгорочната реакција на системот, додека емпириските мерења ја прикажуваат моменталната состојба под влијание на сите фактори на теренот.



Слика 87. Споредба на емпириски и симулирани вредности на просечната стапка на деградација (δ) во функција од бројот на машински интервенции (n). (Извор: сопствени пресметки)

На основа на резултатите и компарацијата може да се изведат следните заклучоци:

- Оптималниот број интервенции изнесува една до две во двегодишен период, што претставува најдобар однос меѓу геометриско подобрување на колосекот и зачувување на квалитетот долниот строј.
- Зголемувањето на бројот на интервенции над оваа граница нема позитивен ефект и може да предизвика постепено губење на стабилноста на засторот.
- Интервал од околу четири години со вкупно две интервенции претставува најрационално сценарио за анализираната делница на пругата Колашин – Подгорица, со стабилен TQI и минимални потреби за корективно одржување.
- Симулациските резултати потврдуваат дека моделите можат успешно да се користат за предиктивно планирање на интервенциите, но нивните излезни вредности треба да се коригираат врз основа на емпириски податоци за специфични делници.

Интеграцијата на емпириските мерења и симулираните резултати создава цврста аналитичка рамка за управување со одржувањето на колосекот.

Резултатите ја потврдуваат потребата од умерен и планиран режим на регулирање, при кој се избегнуваат и преголеми интервали меѓу интервенциите и прекумерна фреквенција на машинско влијание.

Со примената на овој пристап се обезбедува долгорочна стабилност на долниот строј, оптимална состојба на геометријата и рационално искористување на техничките и финансиските ресурси.

На тој начин, симулираните и емпириските резултати заедно ја дефинираат технички и економски оправданата стратегија за машинско регулирање на колосекот, применлива и за други делници со слични карактеристики на оптоварување и материјална структура.

8.4. Инженерска примена на моделите и стратегии за управување со одржувањето на колосекот

Развиените модели и аналитички постапки претставуваат основа за развој на практичен инструмент за поддршка на инженерските одлуки при управувањето со железничката инфраструктура. Наместо да се користат исклучиво за ретроспективна анализа, добиените резултати можат да се применат во предиктивно и стратешко планирање на одржувањето, со цел навремено препознавање на критични делници и оптимално темпирање на интервенциите.

Преку интеграција на податоците за геометрија, застор и историја на интервенции во моделска рамка, можно е воспоставување на систем кој континуирано ја следи состојбата на колосекот и врз основа на трендови на TQI автоматски предлага приоритети за одржување. Таквиот пристап создава премин од класично реактивно кон предиктивно управување, што претставува суштинска промена во инженерската пракса на одржување.

Дополнително, резултатите овозможуваат да се дефинира економски оправдан режим на активности, со оптимален број на машински интервенции, избалансиран во однос на техничката стабилност, достапноста на трасата и расположливите ресурси. Со ваков пристап, одржувањето се трансформира во процес заснован на податоци, при што секоја одлука се темели на реално измерени трендови, предвидени вредности и симулациски сценарија.

8.4.1. Применливост на моделите во системи за предиктивно одржување

Моделите за предвидување на TQI, особено Random Forest и MLP, можат да бидат интегрирани во софтверски системи за предиктивно одржување (Predictive Maintenance Systems). Во рамки на вакви системи, моделите се користат за континуирано ажурирање на состојбата на секоја делница и за пресметка на очекуваното влошување во наредниот период.

Овој концепт овозможува инженерите да планираат интервенции врз основа на предвидени трендови наместо на фиксни рокови, што значи дека одржувањето станува динамично и адаптивно. Ваквата интеграција може да се изведе преку поврзување со база на мерења од возила за геометриски надзор (EM80L, EM120) и автоматска обработка на податоците за TQI, радиус, брзина и историја на подбивања.

8.4.2. Инженерски и економски аспекти на примена

Еден од клучните придонеси на предложената методологија е можноста да се балансира техничката стабилност со економската оправданост. Анализата на краткорочните и долгорочните ефекти овозможува идентификација на точката на оптимална ефикасност, при која се постигнува најниска деградација со најмал број интервенции.

Во практична смисла, ова значи дека со две интервенции на секои четири години (или една на секои две години) се постигнува најдобар однос меѓу подобрување на геометријата и зачувување на долниот строј, без непотребни трошоци и дополнителни механички влијанија.

Овој пристап може да се прошири и на економски модели кои ја поврзуваат фреквенцијата на одржување со животниот век на колосекот и годишните трошоци, со што би се овозможило донесување на одлуки врз основа на интегрирана техничко – економска анализа.

8.4.3. Препораки за инженерска имплементација

За практична примена на разработените модели и аналитички резултати, потребно е воспоставување на системски пристап кој ќе овозможи нивна интеграција во тековните процеси на одржување и планирање. Во таа насока, се предлагаат следните инженерски чекори:

1. Институционално воспоставување на база на податоци за TQI, која ќе ги содржи сите мерења по години и сите параметри поврзани со одржувањето (интервенции, старост, сообраќајно оптоварување).
2. Автоматизирана анализа на деградација и предвидување, базирана на обука на модели за секоја подделница, со редовно ажурирање на податоците.
3. Визуелна платформа за поддршка на одлуки, која ќе прикажува мапа на трасата со TQI трендови, ризични зони и препорачан број интервенции по временски циклус.
4. Интеграција со буџетски и оперативни планови, со цел рационално планирање на машински ресурси, материјали и човечки капацитети.
5. Вклучување на моделските резултати во процесот на ревизија на стратегиите за одржување, со цел системски премин кон одлучување засновано на податоци (data-driven).

Со обединување на статистичките и машинските модели, анализите на деградација и оптимизацијата на интервенциите, истражувањето создава унифициран пристап за управување со состојбата на колосекот. Ваквата рамка овозможува долгорочно следење на ефектите од одржувањето, планирање на активности според реални потреби и постепено воведување на предиктивни системи во железничката пракса.

На тој начин, истражувањето не претставува само научен придонес, туку и конкретна инженерска алатка за подобрување на ефикасноста, безбедноста и одржливоста на железничката инфраструктура.

8.5. Ограничувања и насоки за идни истражувања

Иако применетата методологија овозможува високо ниво на аналитичка точност и интерпретабилност, истражувањето е предмет на одредени ограничувања кои произлегуваат од достапноста на податоците, хомогеноста на набљудуваниот систем и претпоставките вградени во моделите. Овие ограничувања не ја намалуваат вредноста на резултатите, но ја нагласуваат потребата од нивно понатамошно унапредување и проширување.

8.5.1. Методолошки ограничувања и ограничувања во достапноста и квалитетот на податоците

Применетите модели се засноваат на четири временски серии на мерења (2017, 2019, 2022 и 2024), што овозможува валидна анализа на деградациските трендови, но ја ограничува способноста за моделирање на краткорочни флукуации. Поголема временска резолуција на податоците би овозможила подетално следење на динамиката на деградацијата, особено по секоја поединечна интервенција.

Дополнително, анализата се темели на агрегирани вредности на TQI за делници од 20 m, што може да ја намали прецизноста при откривање на локални неправилности. Иако овој пристап е во согласност со стандардите (EN 13848-5), идните истражувања би можеле да применат поголема просторна резолуција за подобро издвојување на критичните микрo-зони.

Кај дел од податоците за машински интервенции недостасуваат детални информации за датум, тип и обем на изведените активности, што може да влијае врз калибрацијата на моделите. Овие ограничувања ја истакнуваат потребата од воспоставување на стандарден систем за регистрирање и архивирање на активности за одржување.

8.5.2. Можности за проширување на моделите

Понатамошното развивање на предложената методологија може да опфати дополнителни параметри што директно влијаат на стапката на деградација, како што се состојбата на засторот, интензитетот на врнежите и температурните промени. Интеграцијата на климатските фактори е особено значајна за делниците во планински подрачја, каде промените на влага и температура создаваат циклични напрегања и влијаат врз стабилноста на долниот строј.

Исто така, постои можност за примена на хибридни модели, во кои статистичките и машинските пристапи би се комбинирале со физички модели кои го моделираат контактот меѓу засторот и праговите и ги пресметуваат контактните напрегања и деформации. Ваквите модели би овозможиле подобра квантификација на долгорочните ефекти од механичкото влијание и појасна идентификација на критичните прагови на интервенции.

8.5.3. Интеграција на економските и аспектите од животниот циклус на инфраструктурата

Следната фаза во развојот на ова истражување може да вклучи интеграција на економски критериуми, со цел моделирање на целосниот животен циклус на колосекот (Life-Cycle Assessment, LCA). Преку поврзување на техничките резултати со трошоците за интервенции, одржување и застои во сообраќајот, можно е да се дефинира оптимален однос меѓу техничката ефикасност и економската одржливост.

Ова би овозможило развој на сеопфатен модел за одлуки засновани на трошок-ефикасност (Cost-Benefit Analysis), кој ќе ги комбинира предвидените TQI вредности со проектираните трошоци низ временскиот период. На тој начин, моделите би можеле да се применат не само за техничка оптимизација, туку и како поддршка во долгорочно буџетско и стратешко планирање.

Со обединување на моделите за предвидување, анализите на деградација и проценките на ефектите од интервенции, истражувањето воспоставува практична основа за предиктивно управување со железничката инфраструктура и рационално користење на техничките и финансиските ресурси.

9. ЗАКЛУЧОК

Истражувањето ја разгледува комплексната појава на деградација на геометријата на колосекот и ефикасноста на машинското одржување на анализираната делница од пругата Колашин – Подгорица, со цел да се развие унифицирана методологија за предвидување на индексот на квалитет на колосекот (TQI) и оптимизација на бројот и фреквенцијата на интервенциите. Главниот истражувачки проблем е поврзан со потребата од објективен и квантитативен пристап за управување со состојбата на колосекот, кој ќе ги обедини мерењата, моделите и инженерската интерпретација во еден интегриран систем за поддршка на одлучување во процесот на одржување на колосекот.

Анализата ги опфати податоците од четири мерења (2017, 2019, 2022 и 2024) и вклучи повеќе категории на променливи: геометриски, инфраструктурни, оперативни и параметри на одржување. Применети беа шест модели на предвидување, меѓу кои три статистички и три од машинско учење, со примена на петкратна вкрстена валидација (5-fold cross-validation). Највисока точност и стабилност е постигната со Random Forest моделот ($R^2 = 0.69$), кој најуспешно ја репрезентира нелинеарната природа на процесот на деградација. Полиномната регресија од втор степен се покажа како најсоодветен статистички компромис, со доволна интерпретабилност и прифатлива точност ($R^2 = 0.63$). Овие резултати потврдуваат дека комбинираниот пристап, примената на машински модели за предвидување и статистички модели за интерпретација, претставува најсоодветна стратегија за инженерска анализа на квалитетот на колосекот.

Деградациските анализи ја опишаа долгорочната динамика на колосекот и открија карактеристични периоди на стабилизација и повторно влошување. Највисока стапка на деградација е забележана во интервалот km 394–399, каде се јавуваат повторливи нарушувања на геометријата по секоја машинска активност. Овие делници имаат зголемена чувствителност на динамички оптоварувања и се наоѓаат на делови каде геолошките услови ја проблематизираат стабилноста на долниот строј. Според геолошките податоци за подрачјето помеѓу Морача и Подгорица, подлогата е составена од седиментни и алувијални наслаги со зголемена водопропусност и високо ниво на подземни води, што овозможува акумулација на влага и локални слегнувања на засторот. Ова доведува до побрза деградација на геометријата и потреба од почести интервенции на регулирање на колосекот и подбивање на засторот.

За разлика од тоа, делниците во горниот дел на трасата (околу Колашин) се развиени на компактни варовници и доломити, кои претставуваат стабилна карстна подлога со ниска компресибилност и ограничена инфилтрација на вода. Таквите геолошки услови придонесуваат за повисока стабилност на долниот строј, порамномерна распределба на оптоварувањата и поспора, континуирана деградација на геометријата на колосекот.

Овие резултати дополнително ја потврдуваат потребата геолошките и хидрогеолошките услови да се вклучат како критериум во процесот на моделирање, оценка на ризик и планирање на интервенциите, со цел да се развијат поефикасни стратегии за управување со состојбата на колосекот и оптимизација на ресурсите за одржување.

Резултатите од оптимизацијата дефинираат јасна зависност меѓу бројот на интервенции и нивната ефикасност. Две интервенции во двегодишен циклус претставуваат најповолен сооднос меѓу краткорочниот ефект (намалување на $\Delta TQI \approx -0.32$) и долгорочната стабилност ($\delta \approx -0.6$). Поголем број активности не води кон дополнително подобрување, бидејќи засторот ја достигнува границата на компактирање, по што системот

реагира со слабеење на ефектот и забрзана повторна деградација. Овој резултат ја потврдува потребата од умерен и плански пристап кон машинското регулирање, каде фреквенцијата на интервенции се темели на анализи на трендови, а не на фиксен временски распоред.

Истражувањето има директни практични импликации. Примената на развиените модели овозможува премин од реактивно кон предиктивно одржување, каде одлуките за интервенции се засноваат на пресметана состојба, а не на визуелна проценка. На тој начин се обезбедува подобра распределба на ресурси, намалување на непотребните интервенции и зголемување на долгорочната стабилност на колосекот. Методологијата може да послужи како основа за воспоставување на национален систем за следење на квалитетот на колосекот и оптимизација на плановите за одржување, применлив и на други делници со слични геотехнички и експлоатациски услови.

И покрај високото ниво на аналитичка точност, истражувањето е ограничено со недостиг на подетални податоци за типот и обемот на интервенциите, како и со четиригодишниот временски интервал на мерења. Поголема резолуција и континуирано мерење би овозможиле подобра анализа на моменталната реакција на трасата по секоја интервенција. Идните истражувања може да се насочат кон вклучување на дополнителни фактори, како климатски влијанија, оптоварување, старост на засторот и структурни карактеристики на долниот строј, со цел да се развие сеопфатен модел на животниот циклус (Life-Cycle Model) што ги поврзува техничките и економските аспекти на одржувањето.

Дополнително, применетата методологија има потенцијал за практична имплементација во системите на железничките оператори како „Железничка инфраструктура на Црна Гора“ (ЖИЦГ) и „Македонски железници – Инфраструктура“. Со интегрирање на развиените модели во нивните системи за мониторинг на геометријата на колосекот, може да се воспостави автоматизиран процес за предвидување на деградацијата и навремено планирање на машинските активности. Ваквата примена овозможува рационално користење на механизацијата, оптимизација на буџетот и подобрување на безбедноста и достапноста на железничките линии. Методологијата може да се прилагоди и на други оператори во регионот, како дел од регионален систем за предиктивно управување со инфраструктурата.

Истражувањето претставува оригинален научен и инженерски придонес во областа на железничкото одржување. Комбинирањето на повеќегодишни теренски мерења со напредни аналитички и машински модели создава единствена рамка за интегрална проценка на квалитетот на колосекот. Оваа рамка може да се примени како поддршка при донесување одлуки на национално ниво, при ревизија на стратегиите за одржување и при изработка на технички прирачници за управување со геометријата на колосекот. Со тоа, трудот не само што обезбедува научна основа за подобрување на ефикасноста на управување со инфраструктурата, туку создава и практичен модел што може да биде пример за идни истражувања и примена во поширок регионален контекст.

Применетата вредност на трудот се состои во тоа што развиената методологија овозможува повисок степен на техничка контрола и предвидливост во процесот на одржување, со што се намалуваат трошоците и се зголемува доверливоста на инфраструктурата. Потенцијалот за имплементација во националните системи на железничките оператори овозможува премин кон современ концепт на управување со бази на податоци, автоматизирани извештаи и модели за оптимизација на интервенциите. Преку оваа насока, истражувањето придонесува кон усогласување со европските стандарди EN

13848, UIC 518 насоките на Агенцијата на Европската унија за железници (ERA) за дигитално управување со инфраструктурата.

Резултатите создаваат предуслов за развој на интегрирани системи за дигитален мониторинг и моделирање на одржувањето, базирани на машинско учење и предиктивни анализи. Таквите системи би овозможиле следење во реално време на промените на геометријата на колосекот, предвидување на ризици и автоматско приоритизирање на интервенциите. Примената на овој концепт би можела да обезбеди поголема стабилност, намалени прекини во експлоатацијата и рационално распределување на техничките ресурси.

Заклучно, истражувањето создава кохерентна и практично применлива рамка за предвидување на деградацијата и планирање на машинските активности на железничките делници. Преку интеграција на статистички и машински модели со инженерска анализа, се воспоставува основа за современ систем на предиктивно, економски рационално и технички одржливо управување со геометријата на колосекот, модел што може да биде репер за идни истражувања и практична примена во регионот и пошироко.

Користена литература

- [1] H. Widyastuti, A. F. Sedayu, W. S. Budhi, W. K. C. Chiu and Istiar, "Prediction of speed limit on the railway track using track quality index and multibody dynamics simulation," in *Structural Health Monitoring*, Queensland, 2023.
- [2] P. Xu, Q. Sun, R. Liu, R. R. Souleyrette and F. Wang, "Optimizing the Alignment of Inspection Data from Track Geometry Cars," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 19-35, 2015.
- [3] P. Bocz, Á. Vinkó and Z. Posgay, "A practical approach to tramway track condition monitoring: vertical track defects detection and identification using time-frequency processing technique," *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, vol. 13, no. s1, pp. 135 - 146, 2018.
- [4] J. Morais, P. Morais, C. Santos, A. Paixão and E. Fortunato, "Railway track support condition assessment—Initial developments on a vehicle-based monitoring solution through modal analysis," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 236, no. 9, pp. 1058-1069, 2022.
- [5] M. T. Andani, A. Peterson, J. Munoz and M. Ahmadian, "Railway track irregularity and curvature estimation using doppler LIDAR fiber optics," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 232, no. 1, pp. 63-72, 2016.
- [6] J.-A. Zakeri and V. Ghorbani, "Investigation on dynamic behavior of railway track in transition zone," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 25, p. 287–292, 2011.
- [7] A. Jamshidi, S. Hajizadeh, Z. Su, M. Naeimi, A. Núñez, R. Dollevoet, B. D. Schutter and Z. Li, "A decision support approach for condition-based maintenance of rails based on big data analysis," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 95, pp. 185-206, 2018.
- [8] M. Sauni, H. Luomala, P. Kolisoja and E. Turunen, "Investigating Root Causes of Railway Track Geometry Deterioration – A Data Mining Approach," *Frontiers in Built Environment*, vol. 6, 2020.
- [9] Q. Chen, X. Niu, L. Zuo, T. Zhang, F. Xiao, Y. Liu and J. Liu, "A Railway Track Geometry Measuring Trolley System Based on Aided INS," *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 538, 2018.
- [10] J. Jönsson, I. A. Khouy, J. Lundberg, M. Rantatalo and A. Nissen, "Measurement of vertical geometry variations in railway turnouts exposed to different operating conditions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 230, no. 2, p. 486–501, 2014.
- [11] J. Sresakoolchai and S. Kaewunruen, "Railway defect detection based on track geometry using supervised and unsupervised machine learning," *Structural Health Monitoring*, vol. 21, no. 4, p. 1757–1767, 2022.
- [12] D. Prescott and J. Andrews, "A track ballast maintenance and inspection model for a rail network," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 227, no. 3, p. 251–266, 2013.

- [13] B. Bhardwaj, R. Bridgelall, P. Lu and N. Dhingra, "Signal Feature Extraction and Combination to Enhance the Detection and Localization of Railroad Track Irregularities," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 5, p. 6555–6563, 2021.
- [14] M. Zhu, X. Cheng, L. Miao, X. Sun and S. Wang, "Advanced Stochastic Modeling of Railway Track Irregularities," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 5, p. Article ID 401637, 2013.
- [15] M. Sysyn, O. Nabochenko, V. Kovalchuk and U. Gerber, "Evaluation of railway ballast layer consolidation after maintenance works," *Acta Polytechnica*, vol. 59, no. 1, p. 77–87, 2019.
- [16] Q. Chen, X. Niu, Q. Zhang and Y. Cheng, "Railway track irregularity measuring by GNSS/INS integration," *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, vol. 62, no. 1, p. 83–93, 2015.
- [17] Y. K. Al-Douri, P. Tretten and R. Karim, "Improvement of railway performance: a study of Swedish railway infrastructure," *Journal of Modern Transportation*, vol. 24, p. 22–37, 2016.
- [18] I. A. khouy, P.-O. Larsson-Kråik, A. Nissen, J. Lundberg and U. Kumar, "Geometrical degradation of railway turnouts: A case study from a Swedish heavy haul railroad," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 228, no. 6, p. 611–619, 2013.
- [19] C. Fecarotti and J. Andrews, "A Petri net approach to assess the effects of railway maintenance on track availability," *Infrastructure Asset Management*, vol. 7, no. 3, p. 201–220, 2020.
- [20] B. Davies and J. Andrews, "The impact of summer heatwaves on railway track geometry maintenance," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 235, no. 9, p. 1158–1171, 2021.
- [21] M. C. Nakhaee, D. Hiemstra, M. Stoelinga and M. v. Noort, "The Recent Applications of Machine Learning in Rail Track Maintenance: A Survey," in *Reliability, Safety, and Security of Railway Systems: Modelling, Analysis, Verification, and Certification (RSSRail 2019)*, Lille, 2019.
- [22] J. Chiachío, M. Chiachío, D. Prescott and J. Andrews, "A Bayesian assessment for railway track geometry degradation," in *PHM Society European Conference*, Copenhagen, 2018.
- [23] C. Higgins and X. Liu, "Modeling of track geometry degradation and decisions on safety and maintenance: A literature review and possible future research directions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 232, no. 5, p. 1385–1397, 2017.
- [24] P. Barkhordari, R. Galeazzi and M. Blanke, "Monitoring of Turnout Ballast Degradation Using Statistical Low-Complexity Behavioral Models," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 29, no. 1, p. 278–293, 2021.
- [25] Z. Krakutovski, "Study of Railway Track Renewal of Corridor X in Republic of Macedonia: Technical Preparation and Economic Assessment," Faculty of Civil Engineering, Skopje, Skopje, 2009.

- [26] S. E. E. T. O. (SEETO), "Report on Rail Maintenance on TEN-T Core Network in Western Balkans," South East Europe Transport Observatory (SEETO), Belgrade, 2016.
- [27] S. Jovanović, D. Božović and M. Tomičić-Torlaković, "Mjerenje i analiza stanja željezničke infrastrukture kao osnova za upravljanje," *Građevinar*, vol. 66, no. 4, p. 347–358, 2014.
- [28] S. Jovanović, H. Guler and B. Čoko, "Track degradation analysis in the scope of railway infrastructure maintenance management systems," *Građevinar*, vol. 67, no. 3, p. 247–258, 2015.
- [29] N. Elkhoury, L. Hitihamillage, S. Moridpour and D. Robert, "Degradation Prediction of Rail Tracks: A Review of the Existing Literature," *Open Transportation Journal*, vol. 12, 2018.
- [30] H. Khajehei, A. Ahmadi, I. Soleimanmeigouni, M. Haddadzade, A. Nissen and M. J. L. Jebelli, "Prediction of track geometry degradation using artificial neural network: a case study," *International Journal of Rail Transportation*, vol. 10, no. 1, p. 24–43, 2021.
- [31] I. Soleimanmeigouni, A. Ahmadi, A. Nissen and X. Xiao, "Prediction of railway track geometry defects: a case study," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 16, no. 7, p. 987–1001, 2019.
- [32] A. P. Patra, Maintenance Decision Support Models, Luleå: Luleå University of Technology, 2009.
- [33] C. Stenström, Operation and Maintenance Performance of Rail Infrastructure: Model and Methods, Luleå: Luleå University of Technology, 2014.
- [34] С. н. Р. Македонија, "Закон за железници," „Службен весник на Република Македонија“ бр. 13/2013, Скопје, 2013.
- [35] Е. комисија, "Извештај за напредокот на железничката инфраструктура во Западен Балкан," Европска комисија, Брисел, 2019.
- [36] М. у. з. ж. (UIC), "Стандарди и препораки за железничка инфраструктура," UIC Publications, Париз, 2020.
- [37] М. з. т. и. в. н. Р. С. Македонија, "Стратегија за развој на железничкиот транспорт," Министерство за транспорт и врски, Скопје, 2021.
- [38] С. банка, "Проект за модернизација на железничката инфраструктура во Република Северна Македонија," Светска банка, Вашингтон D.C., 2018.
- [39] Т. м. з. т. (TEN-T), "Стратегија за развој на транспортната инфраструктура во Европа," Европска комисија – Генерален директорат за мобилност и транспорт (DG MOVE), Брисел, 2020.
- [40] М. з. т. и. в. н. Р. С. Македонија, "Правилник за одржување на железничката инфраструктура," Министерство за транспорт и врски, Скопје, 2012.
- [41] M. Dedík, V. Štefancová, J. Gašparík, V. Lupták and M. Vojtek, "Traffic Capacity Assessment of the Selected Track Section on the Slovak Railways Network after the Implementation of ETCS L3 Based on Signaling Principle," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 11, p. 5597, 2022.

- [42] A. Mamou, W. Powrie, J. A. Priest and C. Clayton, "The effects of drainage on the behaviour of railway track foundation materials during cyclic loading," *Géotechnique*, vol. 67, no. 10, p. 845–854, 2017.
- [43] M. Odashima, S. Azami, Y. Naganuma, H. Mori and H. Tsunashima, "Track geometry estimation of a conventional railway from car-body acceleration measurement," *Mechanical Engineering Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 16-00498, 2017.
- [44] M. Dedík, V. Štefancová, J. Gašparík, V. Ľupták and M. Vojtek, "Traffic Capacity Assessment of the Selected Track Section on the Slovak Railways Network after the Implementation of ETCS L3 Based on Signaling Principle," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 11, p. 5597, 2022.
- [45] L. Pintelon, A. Parodi-Herz, K. A. H. Kobbacy and D. N. P. Murthy, "Maintenance: An Evolutionary Perspective," in *Complex System Maintenance Handbook*, London, Springer, 2008, pp. 21-48.
- [46] Z. Popović, L. Lazarević, L. Brajović, M. Mićić and N. Mirković, "Improvement recommendations for railway infrastructure maintenance," in *E3S Web of Conferences, Volume 157 – Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019)*, Belgrade, 2020.
- [47] L. Ciocoiu, C. E. Siemieniuch and E.-M. Hubbard, "From preventative to predictive maintenance: The organisational challenge," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 231, no. 10, p. 1174–1185, 2017.
- [48] M. Ogino, H. Tsunashima, K. Yanagisawa, H. Mori, A. Asano and S. Wakai, "Development of Track Condition Monitoring System Based on Compact Onboard Sensing Devices," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 135, no. 4, p. 395–402, 2015.
- [49] M. Sedghi, B. Bergquist, E. Vanhatalo and A. Migdalas, "Data-driven maintenance planning and scheduling based on predicted railway track condition," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 38, no. 7, p. 3689–3709, 2022.
- [50] J. Ye, E. Stewart, D. Zhang, Q. Chen and C. Roberts, "Method for automatic railway track surface defect classification and evaluation using a laser-based 3D model," *IET Image Processing*, vol. 14, no. 12, p. 2701–2710, 2020.
- [51] M. Brahimi, K. Medjaher, M. Leouatni and N. Zerhouni, "Prognostics and Health Management for Overhead Contact Line System - A Review," *International Journal of Prognostics and Health Management*, vol. 7, pp. 1-15, 2016.
- [52] J. A. Zakeri, M. Esmaeili and H. Heydari-Noghabi, "A field investigation into the effect of under sleeper pads on the reduction of railway-induced ground-borne vibrations," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 230, no. 3, p. 999–1005, 2015.
- [53] M. M. Baldi, R. Tadei, F. Heinicke and A. Simroth, "New Heuristics for the Stochastic Tactical Railway Maintenance Problem," *Omega*, vol. 63, p. 94–102, 2016.

- [54] М. з. Т. и. Врски, "Правилник за начинот на одржување, начинот на водење на евиденција и користењето на податоците од евиденцијата на горниот строј на пругите," Службен весник на Република Македонија, Скопје, 2007.
- [55] C. Meier-Hirmer, G. Riboulet, F. Sourget and M. Roussignol, "Maintenance optimization for a system with a gamma deterioration process and intervention delay: Application to track maintenance," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 223, no. 3, p. 189–198, 2009.
- [56] T. Zhang, J. Andrews and R. Wang, "Optimal Scheduling of Track Maintenance on a Railway Network," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 29, no. 2, p. 285–297, 2012.
- [57] C. D. Dao, A. Hartmann, A. Lamper and P. Herbert, "Scheduling Infrastructure Renewal for Railway Networks," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 25, no. 4, p. 04019030, 2019.
- [58] L. Izvolt, J. Sestakova and M. Smalo, "Analysis of Results of Monitoring and Prediction of Quality Development of Ballasted and Ballastless Track Superstructure and its Transition Areas," *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, vol. 18, no. 4, p. 19–29, 2016.
- [59] B. Davies and J. Andrews, "Railway track availability modelling with opportunistic maintenance practice," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 236, no. 8, p. 907–919, 2021.
- [60] E. J. Palin, I. S. Oslakovic, K. Gavin and A. Quinn, "Implications of climate change for railway infrastructure," *WIREs Climate Change*, vol. 12, no. 5, p. e728, 2021.
- [61] S. Zhou, B. Wang and Y. Shan, "Review of research on high-speed railway subgrade settlement in soft soil area," *Railway Engineering Science*, vol. 28, p. 129–145, 2020.
- [62] I. Soleimanmeigouni, A. Ahmadi, I. A. Khouy and C. Letot, "Evaluation of the effect of tamping on the track geometry condition: A case study," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 232, no. 2, p. 408–420, 2016.
- [63] C. Laiton-Bonadiez, J. W. Branch-Bedoya, J. Zapata-Cortes, E. Paipa-Sanabria and M. Arango-Serna, "Industry 4.0 Technologies Applied to the Rail Transportation Industry: A Systematic Review," *Sensors*, vol. 22, no. 7, p. 2491, 2022.
- [64] S. MajidiParast, R. N. Monemi and S. Gelareh, "A graph convolutional network for optimal intelligent predictive maintenance of railway tracks," *Decision Analytics Journal*, vol. 14, p. 100542, 2025.
- [65] Z. Wei, A. Núñez, Z. Li and R. Dollevoet, "Evaluating Degradation at Railway Crossings Using Axle Box Acceleration Measurements," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2236, 2017.
- [66] M. Carnevale, I. L. Paglia and P. Pennacchi, "An algorithm for precise localization of measurements in rolling stock-based diagnostic systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 235, no. 7, p. 827–839, 2020.

- [67] M. R. Hernández, A. Sánchez-Herguedas, V. González-Prida, S. S. Contreras and A. C. Márquez, "Digitalization and Dynamic Criticality Analysis for Railway Asset Management," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 22, p. 10642, 2024.
- [68] S. Minisi, A. Garrone, L. Oneto, R. Canepa, C. Dambra and D. Anguita, "Simple Non Regressive Informed Machine Learning Model for Predictive Maintenance of Railway Critical Assets," in *ESANN 2022 Proceedings, European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning*, Bruges, Belgium, 2022.
- [69] A. Parida and G. Chattopadhyay, "Development of a multi-criteria hierarchical framework for maintenance performance measurement (MPM)," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 13, no. 3, p. 241–258, 2007.
- [70] V. Macchiarulo, P. Milillo, C. Blenkinsopp and G. Giardina, "Monitoring deformations of infrastructure networks: A fully automated GIS integration and analysis of InSAR time-series," *Structural Health Monitoring*, vol. 21, no. 4, p. 1849–1878, 2022.
- [71] M. El-Sibaie and Y.-J. Zhang, "Objective Track Quality Indices," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1863, no. 1, p. 81–87, 2004.
- [72] G. Lönnbark, "Characterization of Track Irregularities: With respect to vehicle response," Stockholm, Sweden, 2012.
- [73] Ж. Ј. (ЖЖ), "339 Упутство о јединственим критеријумима за контролу стања пруга на мрежи ЖЖ," Београд, 2001.
- [74] C. –. E. C. f. Standardization, "EN 13848-1:2003/A1:2008 Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 1: Characterization of track geometry," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2008.
- [75] A. Gregori, E. D. Giampaolo, A. D. Carlofelice and C. Castoro, "Presenting a New Wireless Strain Method for Structural Monitoring: Experimental Validation," *Journal of Sensors*, p. Article ID 5370838, 2019.
- [76] M. Li, Z. Hu, B. Yan, J. Wang, H. Zhang, F. Ye, B. Sun, J. Liu, Y. Li, G. Ding, F. Zang and Z. Yang, "A flexible resistive strain gauge with reduced temperature effect via thermal expansion anisotropic composite substrate," *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 10, p. 129, 2024.
- [77] S. Kaewunruen, C. Ngamkhanong and J. Ng, "Influence of time-dependent material degradation on life cycle serviceability of interspersed railway tracks due to moving train loads," *Engineering Structures*, vol. 199, p. 109625, 2019.
- [78] C. Ngamkhanong, D. Li, A. Remennikov and S. Kaewunruen, "Dynamic capacity reduction of railway prestressed concrete sleepers due to surface abrasions considering the effects of strain rate and prestressing losses," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 18, no. 04, p. 1850041, 2018.

- [79] I. Soleimanmeigouni, A. Ahmadi and U. Kumar, "Track geometry degradation and maintenance modelling: A review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 232, no. 1, p. 73–102, 2016.
- [80] B. N. S. N. S. R. C. Indraratna and T. Neville, "Performance monitoring — case studies of tracks stabilised by geosynthetic grids and prefabricated vertical drains," in *FMGM 2015: Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, Perth, 2015.
- [81] X. Li, M. Ekh and J. C. O. Nielsen, "Three-dimensional modelling of differential railway track settlement using a cycle domain constitutive model," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 40, no. 12, p. 1758–1770, 2016.
- [82] S. Galván-Núñez and N. Attoh-Okine, "A threshold-regression model for track geometry degradation," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid*, vol. 232, no. 10, p. 2456–2465, 2018.
- [83] M. Oregui, S. Li, A. Núñez, Z. Li, R. Carroll and R. Dollevoet, "Monitoring bolt tightness of rail joints using axle box acceleration measurements," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 23, no. 10, p. 1348–1362, 2016.
- [84] P. Rodrigues and P. F. Teixeira, "Influence of ballast and railway substructure on the degradation of local geometry defects," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 238, no. 7, p. 814–826, 2024.
- [85] Y. Guo, V. Markine, X. Zhang, W. Qiang and G. Jing, "Image analysis for morphology, rheology and degradation study of railway ballast: A review," *Transportation Geotechnics*, vol. 18, p. 173–211, 2019.
- [86] F. O. Olusola and A. Oluwatobi, "In-situ foundation characterization and design in Ese Odo Local Government Area of Ondo State, Southwestern Nigeria," *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, vol. 3, no. 2, p. 1–18, 2020.
- [87] Y. Liao, L. Han, H. Wang and H. Zhang, "Prediction Models for Railway Track Geometry Degradation Using Machine Learning Methods: A Review," *Sensors*, vol. 22, no. 19, p. 7275, 2022.
- [88] G. Presle, W. Hanreich and P. Mittermayr, "Austrian Track Testing and Recording Car EM 250: Source for Wheel-Rail Interaction Analysis," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1713, no. 1, p. 22–28, 2000.
- [89] A. Merheb, J. Palese, C. M. Hartsough, A. Zarembski and L. Bernucci, "The Influence of Seasonal Effects on Railway Vertical Track Modulus," *Infrastructures*, vol. 9, no. 8, p. 120, 2024.
- [90] P. Weston, C. Roberts, G. Yeo and E. Stewart, "Perspectives on railway track geometry condition monitoring from in-service railway vehicles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 53, no. 7, p. 1063–1091, 2015.
- [91] Z. Zhou, C. Wan, D. Fang, L. Xie, H. Tang, C. Yang, Y. Ding and S. Xue, "Quasi-static macrostrain-based structural damage detection with distributed long-gauge fiber Bragg grating

- sensing," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 31, no. 18, p. 2137–2151, 2020.
- [92] G. Zhang, H. Lu, H. Zhang and H. Zhang, "Design and Application of Railway Intelligent Big Data Information Network Platform," in *2020 International Conference on Big Data Application & Economic Management (ICBDEM 2020)*, China, 2020.
- [93] S. Burzanović, B. Kovačević, B. Marović, M. Miljić and Š. Rastoder, *100 godina željeznice Crne Gore*, Podgorica: Željeznica Crne Gore, 2009.
- [94] C. G. Ministarstvo kapitalnih investicija, "Nacionalni program željezničke infrastrukture 2021–2023," Vlada Crne Gore, Podgorica, 2021.
- [95] (. z. i. p. CIP, "Pruga Beograd – Bar – Opšti podaci o pruži," Centar za integrisano projektovanje, Beograd, 2014.
- [96] C. G. Ministarstvo saobraćaja i pomorstva, "Strategija razvoja željeznice za period 2017–2027," Vlada Crne Gore, Podgorica, 2017.
- [97] I. U. o. R. (UIC), "UIC Leaflet 714: Classification of lines for the purpose of track maintenance," International Union of Railways (UIC), Paris, 2009.
- [98] M. e. p. p. i. u. Crne Gore, "Prostorni plan Crne Gore do 2040 godine: Analiza postojećeg stanja organizacije, uređenja i korišćenja prostora," Vlada Crne Gore, Podgorica, 2023.
- [99] S. Radusinović, *Geologija Crne Gore*, Podgorica: Univerzitet Crne Gore – Studijski program Geografija, 2020.
- [100] S. Radusinović and M. Pajović, "Studija "Povezanost geološke građe sa mogućim nastankom katastrofa i hazarda na teritoriji Crne Gore"," Zavod za geološka istraživanja Crne Gore, Podgorica, 2005.
- [101] M. Mirković, "Strukturno-tektonska karta Crne Gore," Zavod za geološka istraživanja Crne Gore, Podgorica, 1997.
- [102] M. Przybylowicz, M. Sysyn, V. Kovalchuk, O. Nabohchenko and B. Parneta, "Experimental and theoretical evaluation of side tamping method for ballasted railway track maintenance," *Transport Problems*, vol. 15, no. 3, p. 93–106, 2020.
- [103] O. Barbir, D. Adam, F. Kopf, J. Pistro, F. Auer and B. Antony, "Development of condition-based tamping process in railway engineering," *ce/papers – Proceedings in Civil Engineering*, vol. 2, no. 2-3, p. 969–974, 2018.
- [104] K. Eklöf, A. Nwichi-Holdsworth and J. Eklöf, "Novel algorithm for mutual alignment of railway track geometry measurements," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2675, no. 12, p. 995–1004, 2021.

- [105] T. Zhou, B. Hu, B. Yan and J. Sun, "Experimental and numerical study of railway ballast compactness during tamping process," in *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, 2013, p. 2730–2733.
- [106] B. Indraratna, Q. Sun and S. Nimbalkar, "Observed and predicted behaviour of rail ballast under monotonic loading capturing particle breakage," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52, no. 1, p. 73–86, 2015.
- [107] T. EOOD, "Technical Report on the Application of EM 120 for Railway Track Measurements," Tinsa EOOD, Sofia, 2019.
- [108] M. Žarković, Ž. Mitrović, L. Mosurović, J. Steljić and F. Šćekić, "Beskontaktno merenje parametara geometrije koloseka / Non-contact measurement of track geometry parameters," *Železnice*, vol. 39, pp. 39-47, 2023.
- [109] E. C. f. S. (CEN), "EN 13848-1:2019 Railway applications — Track — Track geometry quality — Part 1: Characterization of track geometry," CEN, Brussels, Belgium, 2019.
- [110] I. U. o. R. (UIC), "UIC 518: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour — Safety — Track fatigue — Running behaviour," UIC, Paris, France, 2009.
- [111] N. Andrienko, G. Andrienko and S. Rinzivillo, "Leveraging spatial abstraction in traffic analysis and forecasting with visual analytics," *Information Systems*, vol. 57, pp. 172-194, 2016.
- [112] A. K. Jardine, D. Lin and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483-1510, 2006.
- [113] M. Civera, V. Mugnaini and L. Z. Fragonara, "Machine learning-based automatic operational modal analysis: A structural health monitoring application to masonry arch bridges," *Structural Control and Health Monitoring*, 2022.
- [114] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer Science+Business Media, LLC, 2006.
- [115] T. Hastie, R. Tibshirani and J. H. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, New York, NY: Springer, 2009.
- [116] V. Chandola, A. Banerjee and V. Kumar, "Anomaly detection: A survey," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 41, no. 3, pp. 1-58, 2009.
- [117] G. Fu, S. Wilkinson and R. J. Dawson, "A spatial network model for civil infrastructure system development," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 31, no. 7, p. 491–510, 2016.
- [118] C. Vale and I. M. Ribeiro, "Railway condition-based maintenance model with stochastic deterioration," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 20, no. 5, p. 686–692, 2014.

- [119] P. Iordan, S. O. Mihaela and S. R. Marian, "Dynamic Behavior of Railway Bridges Under High-Speed Traffic Loads," *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, vol. 13, no. 1, pp. 1-16, 2024.
- [120] D. Ivina and Z. Ma, "Stability assessment of railway trackwork scheduling in Sweden," *European Transport Research Review*, vol. 16, p. Article 27, 2024.
- [121] A. Andren, L.-O. Dahlström and E. Nordlund, "Field Observations of Water and Ice Problems in Railway Tunnels from a Maintenance Perspective," *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, vol. 13, no. 1, p. 11–54, 2023.
- [122] N. Mirković, U. Mirković and D. Stevanović, "Requirements for Train-Track-Bridge Dynamic Interaction Analysis," in *International Conference Synergy of Architecture and Civil Engineering (SINARG 2025)*, Nis, 2025.
- [123] X. C. X. L. Y. W. Jianxi Wang, "Influence of heavy haul railway curve parameters on rail wear," *Engineering Failure Analysis*, vol. 57, p. 511–520, 2015.
- [124] Y. Makarov, R. Zaleskyi and M. Mykhalichenko, "Influence of different factors on the value of the rail wear rate," *Acta Technica Jaurinensis*, vol. 17, no. 1, p. 45–58, 2024.
- [125] J. A. Zakeri and K. Yousefian, "Experimental investigation into the longitudinal resistance of ballasted railway track," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 235, no. 8, p. 969–981, 2020.
- [126] X. Li, M. Ekh and J. C. O. Nielsen, "Three-dimensional modelling of differential railway track settlement using a cycle domain constitutive model," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 40, no. 12, p. 1758–1770, 2016.
- [127] J. Costa, P. Antunes, H. Magalhães, J. Pombo and J. Ambrósio, "A novel methodology to automatically include general track flexibility in railway vehicle dynamic analyses," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 235, no. 4, pp. 478-493, 2020.
- [128] B. Indraratna, S. Nimbalkar, P. Anantanaksakul, C. Rujikiatkamjorn and T. Neville, "Performance Monitoring of Rail Tracks Stabilized by Geosynthetics and Shock Mats: Case Studies at Bulli and Singleton in Australia," *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III*, pp. 19-33, 2013.
- [129] I. Majstorović, M. Ahac, J. Madejski and S. Lakušić, "Influence of the Analytical Segment Length on the Tram Track Quality Assessment," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 19, p. 10036, 2022.
- [130] D. P. F. D. R. John Andrews, "A stochastic model for railway track asset management," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 130, pp. 76-84, 2014.
- [131] D. Prescott and J. Andrews, "Investigating railway track asset management using a Markov analysis," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 229, no. 4, pp. 402-416, 2013.

- [132] T. Y. Zhou, B. Hu, P. Xu and B. Yan, "Numerical Study on the Evolution of Force Chain inside Railway Ballast under Tamping Operation," in *Applied Mechanics and Materials, Volume 724*, Pfaffikon, Switzerland, 2015.
- [133] S. Offenbacher, C. Koczwara, M. Landgraf and S. Marschnig, "A Methodology Linking Tamping Processes and Railway Track Behaviour," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, p. 2137, 2023.
- [134] A. Abbasi, J. A. Zakeri, E. Norouzi and S. A. Mosayebi, "Field investigation on the effect of the tamping machine and dynamic track stabilizer on changing the rail support modulus," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 238, no. 9, p. 1072–1083, 2024.
- [135] M. Faris, A. Núñez, Z. Su and B. D. Schutter, "Distributed Optimization for Railway Track Maintenance Operations Planning," in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, HI, USA, 2018.
- [136] E. C. f. S. (CEN), "EN 13848-2:2006+A1:2008 Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 2: Measuring systems – Track recording vehicles," CEN, Brussels, 2008.
- [137] S. Rosati, G. Balestra and M. Knaflitz, "Comparison of Different Sets of Features for Human Activity Recognition by Wearable Sensors," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4189, 2018.
- [138] S. Aksoy and R. M. Haralick, "Feature normalization and likelihood-based similarity measures for image retrieval," *Pattern Recognition Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 563-582, 2001.
- [139] N. Al-Mahrami, N. A. Jabri, A. A. W. Sallam, N. A. Jahdhami and F. Zadjali, "ChromoCheck: Predicting Postnatal Chromosomal Trisomy Cases Using a Support Vector Machine Learning Model," *Genes*, vol. 16, no. 6, p. 695, 2025.
- [140] L. Breiman, "Random forests," *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, p. 5–32, 2001.
- [141] A. I. Nurrisqi, Erfiani and A. M. Soleh, "Comparison of ensemble method performance in classifying blood sugar levels output from non-invasive device," *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 11, no. 3, p. 330–336, 2024.
- [142] D. Chasco-Hernández, J. A. Sanz-Delgado, V. García-Morales and J. Alvarez-Mozos, "Automatic detection of high-voltage power lines in LiDAR surveys using data mining techniques," in *Advances in Design Engineering. INGEGRA 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Cham, Springer, 2020, p. 568–575.
- [143] T.-H. Lee, A. Ullah and R. Wang, "Bootstrap Aggregating and Random Forest," in *Macroeconomic Forecasting in the Era of Big Data (Series: Advanced Studies in Theoretical and Applied Econometrics, vol. 52)*, Cham, Springer, 2019, p. 389–429.
- [144] M. Muhathir, "Compares the effectiveness of the bagging method in classifying spices using the histogram of oriented gradient feature extraction technique," *Jurnal Teknik Informatika C.I.T Medicom*, vol. 15, no. 1, p. 48–57, 2023.

- [145] K. Park, J. Kim and D. Kim, "Early detection of crack vulnerability in foldable displays through critical angle curvature analysis," *Journal of the Society for Information Display*, vol. 33, no. 5, p. 344–352, 2025.
- [146] E. Najjar and A. M. Breesam, "Supervised machine learning a brief survey of approaches," *Al-Iraqia Journal for Scientific Engineering Research*, vol. 2, no. 4, p. 71–82, 2023.
- [147] D. Krstajić, L. J. Buturović, D. E. Leahy and S. Thomas, "Cross-validation pitfalls when selecting and assessing regression and classification models," *Journal of Cheminformatics*, vol. 6, no. 1, p. 10, 2014.
- [148] J. Huang, D. Lu, W. Lin and Q. Yang, "Enhancing slope stability prediction through integrated PCA-SSA-SVM modeling: a case study of LongLian expressway," *Frontiers in Earth Science*, vol. 12, p. 1429601, 2024.
- [149] A. Vabalas, E. Gowen, E. Poliakoff and A. J. Casson, "Machine learning algorithm validation with a limited sample size," *PLOS ONE*, vol. 14, no. 11, p. e0224365, 2019.
- [150] S. M. Kassa, B. Z. Wubineh, A. M. Geremew, N. D. Kumar and G. Kacprzak, "Domain-driven teacher–student machine learning framework for predicting slope stability under dry conditions," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 19, p. 10613, 2025.
- [151] J. Miles, "R squared, adjusted R squared," in *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, Hoboken, Wiley, 2014.
- [152] O. Renaud and M.-P. Victoria-Feser, "A robust coefficient of determination for regression," *Journal of Statistical Planning and Inference*, vol. 140, no. 7, p. 1852–1862, 2010.
- [153] M. J. Uddin and J. Fan, "Interpretable machine learning framework to predict the glass transition temperature of polymers," *Polymers*, vol. 16, no. 8, p. 1049, 2024.
- [154] T. O. Hodson, "Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not," *Geoscientific Model Development*, vol. 15, no. 14, p. 5481–5487, 2022.
- [155] T. Amnuaylojaroen, "Advancements in downscaling global climate model temperature data in Southeast Asia: A machine learning approach," *Forecasting*, vol. 6, no. 1, p. 1–17, 2023.
- [156] S. Raschka, J. Patterson and C. Nolet, "Machine learning in Python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence," *Information (MDPI)*, vol. 11, no. 4, p. 193, 2020.
- [157] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, É. Duchesnay and e. al., "Scikit-learn: Machine learning in Python," 2012.
- [158] Y. Chatelain, N. Yong, G. Kiar and T. Glatard, "PyTracer: Automatically profiling numerical instabilities in Python," 2021.
- [159] W. McKinney, "Data Structures for Statistical Computing in Python," in *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, Austin, TX, USA, 2010.

- [160] Z. Cai, M. Zafferani, O. M. Akande and A. E. Hargrove, "Quantitative Structure–Activity Relationship (QSAR) Study Predicts Small-Molecule Binding to RNA Structure," *Journal of Medicinal Chemistry*, vol. 65, no. 10, p. 7262–7277, 2022.
- [161] J. Shi, Y. Zhang, Y. Chen and Y. Wang, "A smoothness optimization method for horizontal alignment considering ballasted track maintenance," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 38, no. 6, p. 739–761, 2023.
- [162] S. Offenbacher, J. Neuhold, P. Veit and M. Landgraf, "Analyzing Major Track Quality Indices and Introducing a Universally Applicable TQI," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 23, p. 8490, 2020.
- [163] B. V. Schaeybroeck and S. Vannitsem, "Post-processing through linear regression," *Nonlinear Processes in Geophysics*, vol. 18, no. 1, p. 147–160, 2011.
- [164] Y. Resti, C. Irsan, J. F. Latif, I. Yani and N. R. Dewi, "A Bootstrap-Aggregating in Random Forest Model for Classification of Corn Plant Diseases and Pests," *Science & Technology Indonesia*, vol. 8, no. 2, p. 288–297, 2023.
- [165] C. Strobl, A.-L. Boulesteix, T. Kneib, T. Augustin and A. Zeileis, "Conditional variable importance for random forests," *BMC Bioinformatics*, vol. 9, p. 307, 2008.
- [166] J. Mascaro, G. P. Asner, D. E. Knapp, T. Kennedy-Bowdoin, R. E. Martin, C. Anderson, M. Higgins and K. D. Chadwick, "A Tale of Two “Forests”: Random Forest Machine Learning Aids Tropical Forest Carbon Mapping," *PLOS ONE*, vol. 9, no. 1, p. e85993, 2014.
- [167] C.-C. Chang and C.-J. Lin, "Training v-support vector regression: theory and algorithms," *Neural Computation*, vol. 14, no. 8, p. 1959–1977, 2002.
- [168] T. Owolabi, T. A. Saleh, O. Olubosede, M. Souiyah and O. E. Oyeneyin, "Modeling the Specific Surface Area of Doped Spinel Ferrite Nanomaterials Using Hybrid Intelligent Computational Method," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2021, pp. 1–13, 2021.
- [169] H. Kaneko and K. Funatsu, "Fast optimization of hyperparameters for support vector regression models with highly predictive ability," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 142, p. 64–69, 2015.
- [170] K. F. Hiromasa Kaneko, "Fast optimization of hyperparameters for support vector regression models with highly predictive ability," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 142, p. 64–69, 2015.
- [171] L. G. X. L. J. L. Shuai Ma, "Deep Learning for Track Quality Evaluation of High-Speed Railway Based on Vehicle-Body Vibration Prediction," *IEEE Access*, vol. 7, p. 185099–185107, 2019.
- [172] M. Sasidharan and M. E. Torbaghan, "Risk-informed sustainable asset management of railway tracks," *Infrastructure Asset Management*, vol. 8, no. 1, p. 25–35, 2021.
- [173] P. Campa and M. Morales, "Trend analysis by a piecewise linear regression model applied to surface air temperatures in Southeastern Spain (1973–2014)," *Nonlinear Processes in Geophysics Discussions*, 2016.

- [174] W. K. C. D. Barke, "Structural Health Monitoring in the Railway Industry: A Review," *Structural Health Monitoring*, vol. 4, no. 1, p. 81–93, 2005.
- [175] L. M. Quiroga and E. Schnieder, "A Heuristic Approach To Railway Track Maintenance Scheduling," in *WIT Transactions on The Built Environment*, 2010.
- [176] J. Deng, Y. Deng and K. H. Cheong, "Combining conflicting evidence based on Pearson correlation coefficient and weighted graph," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 36, no. 12, pp. 3350–3372, 2021.
- [177] T. Dahiru, "P-Value, a true test of statistical significance? a cautionary note," *Annals of Ibadan Postgraduate Medicine*, vol. 6, no. 1, p. 21–26, 2011.
- [178] S. Williams, R. Carson and K. Tóth, "Moving beyond P values in The Journal of Physiology: A primer on the value of effect sizes and confidence intervals," *The Journal of Physiology*, vol. 601, no. 23, p. 5131–5133, 2023.
- [179] M. F. Ramadhan, I. S. Sitanggang, F. R. Nasution and A. Ghifari, "Parameter Tuning in Random Forest Based on Grid Search Method for Gender Classification Based on Voice Frequency," in *CECE 2017 DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, 2017.
- [180] A. Tayade, S. Patil, V. Phalle, F. Kazi and S. Powar, "Remaining useful life (RUL) prediction of bearing by using regression model and principal component analysis (PCA) technique," *Vibroengineering Procedia*, vol. 23, p. 30–36, 2019.
- [181] F. G. Praticò and M. Giunta, "An Integrative Approach RAMS-LCC to Support Decision on Design and Maintenance of Rail Track," in *Environmental Engineering – 10th International Conference, Vilnius Gediminas Technical University*, 2017.
- [182] K. L. Anders, G. S. Ribeiro, R. da Silva Lopes, P. Amadeu, T. Rodrigues da Costa, T. I. Souza Riback, K. Diogo de Melo Chalegre, W. Pimentel de Oliveira, C. Cabral da Silva, M. V. F. Mendes Blanco, A. L. Pontes Eppinghaus, F. Villas Boas and Fros, "Long-Term Durability and Public Health Impact of City-Wide wMel Wolbachia Mosquito Releases in Niterói, Brazil, During a Dengue Epidemic Surge," *Tropical Medicine and Infectious Disease*, vol. 10, no. 9, p. 237, 2025.

ПРИЛОГ – ТАБЕЛА СО ПОДАТОЦИ

стационарна	TQ ₂₀₁₇	TQ ₂₀₁₉	TQ ₂₀₂₂	TQ ₂₀₂₄	брина	тунел	мост	станица	R [m]	i [%]	сообраќај 2014-2017	сообраќај 2017-2019	сообраќај 2019-2022	сообраќај 2022-2024	старост на прагови	број на активности за регулирање 2017-2019	број на активности за регулирање 2019-2022	број на активности за регулирање 2022-2024	број на активности за профилирање 2017-2019	број на активности за профилирање 2019-2022	број на активности за профилирање 2022-2024
385,70	16,5306	22,4360	17,9381	9,9064	60	0	1	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	0	0	0	1	0
385,72	19,8412	28,4918	25,9009	9,3848	60	0	1	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	0	0	0	1	0
385,74	2,4223	26,3645	28,2070	11,7432	60	0	1	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	1	0
385,76	34,7817	37,6161	39,0010	15,1705	60	0	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	0	1	0	1	0
385,78	20,4215	37,2081	39,2664	18,5343	60	1	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	0	1	0	1	0
385,80	23,9074	44,6636	38,1815	17,4086	60	1	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
385,82	17,9923	33,8821	32,2355	10,7219	60	1	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
385,84	22,2173	38,2084	36,4352	17,1551	60	1	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
385,86	27,0102	41,7080	46,2560	12,3676	60	1	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
385,88	31,0728	41,5028	49,9662	14,4623	60	1	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
385,90	22,2687	29,1647	36,3467	25,0849	60	1	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
385,92	20,4983	49,5372	46,0732	17,9714	60	1	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
385,94	19,6236	26,8965	31,1249	32,7546	60	1	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
385,96	15,1319	38,7327	39,8444	25,9384	60	0	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
385,98	19,9655	42,3196	40,8572	20,2460	60	0	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,00	15,2402	21,7607	23,4062	5,2758	60	0	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,02	11,9412	36,9942	38,1731	9,5726	60	0	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,04	16,8776	44,9950	39,8675	10,8169	60	0	0	0	300	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,06	24,8033	45,8856	42,1635	14,1413	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,08	15,7252	41,2463	30,5915	11,8063	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,10	17,4722	31,1775	35,3861	16,5574	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,12	27,4061	41,6069	37,0001	16,8262	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,14	22,8471	25,4404	31,0163	7,4884	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,16	24,6151	30,0036	30,3255	21,4476	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,18	11,0715	14,9610	20,9619	18,9213	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,20	16,0865	19,1143	17,4839	14,0260	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0
386,22	5,7910	12,6315	9,0798	3,9871	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	0	1	0	1	0

386,24	9,3725	1,9947	4,3587	6,6992	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,26	5,1341	1,4531	1,0815	2,4894	60	0	0	0	0	∞	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,28	2,5101	3,5021	1,4883	3,9068	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,30	15,0537	19,5019	12,3782	6,8057	60	0	1	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,32	15,7804	11,8223	12,9133	12,8226	60	0	1	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,34	10,4127	30,4593	24,7739	26,9422	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,36	12,9900	19,1428	23,0685	28,7481	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,38	21,1985	38,0016	33,2872	13,7443	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,40	23,7867	65,4890	43,8118	20,9948	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,42	17,0941	21,2291	22,4779	19,7653	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,44	20,1264	23,3777	21,9428	12,0376	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,46	18,4690	32,4164	33,1792	15,9907	60	0	1	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,48	21,2214	19,7115	19,7134	15,7909	60	0	1	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,50	14,7674	20,3874	23,2979	20,0821	60	0	1	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,52	7,8798	28,0365	25,7753	15,5093	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,54	11,3254	23,0522	25,5283	18,1584	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,56	14,1281	21,9393	5,8207	6,7084	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,58	11,5776	10,4797	10,5055	8,0162	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,60	8,8283	6,2846	11,0179	5,4311	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,62	7,2353	8,3987	6,7731	9,7196	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,64	6,3876	6,2434	2,6286	13,5658	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,66	13,2338	1,8906	3,2980	2,3852	60	0	0	0	0	∞	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	2	1	1	0	1	0
386,68	3,1082	7,6095	2,9455	7,9181	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,70	7,4501	2,7478	6,0137	3,3044	60	0	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,72	10,4768	5,3749	6,7826	9,3278	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,74	14,8422	35,5889	20,4707	22,5537	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,76	19,0360	12,2409	11,7540	13,0369	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,78	8,5260	29,1567	23,6372	15,7832	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,80	18,5559	50,1967	33,8248	23,1716	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,82	27,1867	34,1846	30,3034	20,4030	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0
386,84	17,2820	29,0390	23,5480	24,9752	60	1	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0

386,86	18,1370	24,6915	25,8666	23,6923	60	1	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	0
386,88	23,3632	31,6251	25,9332	12,4847	60	1	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	0
386,90	16,6177	20,1114	11,7540	5,9553	60	1	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	0
386,92	16,8633	3,3219	6,0240	9,1275	60	1	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	0
386,94	14,6154	11,9840	4,0643	6,8658	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	0
386,96	7,2430	10,8226	5,1718	7,0750	60	0	0	0	300	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	0
386,98	0,7084	2,2758	0,1540	5,5903	60	0	0	0	∞	21,17	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	0
387,00	1,9958	8,5585	3,1700	0,5270	60	0	0	0	∞	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	0
387,02	0,9146	6,4528	7,1875	11,7525	60	1	0	0	∞	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	0	0	1	0	0
387,04	0,4500	13,9164	6,0387	4,8529	60	1	0	0	∞	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	0	0	1	0	0
387,06	9,9490	4,2930	2,0960	3,9042	60	1	0	0	∞	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	0	0	1	0	0
387,08	1,8030	2,6853	3,2692	3,4106	60	1	0	0	∞	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	0	0	1	0	0
387,10	10,5751	1,6572	3,2692	3,2719	60	1	0	0	∞	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	0	0	1	0	0
387,12	4,1944	1,5018	3,9488	7,5468	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,14	9,6192	5,8166	8,0654	3,2827	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,16	16,9860	14,9445	12,6410	8,6963	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,18	4,4702	13,8568	12,6301	8,2544	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,20	3,4938	19,8230	15,2637	16,5561	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,22	13,7150	20,8098	24,1407	16,6429	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,24	9,7553	30,6401	19,3656	21,8441	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,26	4,3085	25,7035	23,8550	20,8140	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,28	18,9542	16,6202	13,7295	14,4821	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,30	5,0364	20,4370	13,3330	15,4557	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,32	8,6302	13,1180	10,8744	7,2470	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,34	4,3237	24,3087	21,7813	8,8000	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,36	2,9667	6,9484	8,4165	7,8339	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,38	9,1096	20,4444	12,0265	13,4727	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,40	3,1065	24,8787	12,9043	8,2484	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,42	3,5959	9,2045	11,6734	10,3326	60	1	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,44	2,7052	14,8967	10,9869	8,1299	60	0	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0
387,46	14,1966	12,7461	9,5966	14,1156	60	0	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	0

387,48	4,1979	7,1110	17,9868	16,2831	60	0	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	1	0	0
387,50	2,9550	7,4409	4,8124	11,0540	60	0	0	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	1	0	0
387,52	5,2458	5,3180	7,0119	1,9191	60	0	1	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	1	0	0
387,54	0,8796	3,0077	2,3594	11,1176	60	0	1	0	700	23,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	1	0	0
387,56	4,6010	4,2800	6,6676	10,8705	60	0	1	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	1	0	0
387,58	3,0468	1,7262	5,0868	2,6864	60	0	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	1	0	0
387,60	0,6967	2,1447	4,3891	7,7647	60	0	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	1	0	0
387,62	2,8600	7,3157	8,9323	5,2203	60	0	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	1	0	0
387,64	9,4751	6,3479	3,0941	5,0897	60	0	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0	1	0	0
387,66	3,9540	2,0117	3,0941	2,1330	60	0	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,68	2,5595	15,7749	10,6214	12,5294	60	0	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,70	15,7100	6,5915	3,8713	1,9137	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,72	5,3412	5,1410	9,4963	11,0094	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,74	5,7460	12,7299	4,6526	1,2684	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,76	7,8601	10,6621	3,6878	3,3973	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,78	4,5647	6,7018	6,1888	4,0884	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,80	26,1664	14,2566	3,6499	2,6580	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,82	5,3172	6,3357	5,2117	6,1508	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,84	2,4048	16,1324	5,4751	4,9072	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,86	13,7987	6,8195	4,1140	3,0553	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,88	3,2744	16,4437	11,7739	14,8235	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,90	0,5439	7,5841	1,9963	3,5751	60	1	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,92	7,6774	6,5359	4,9301	7,4141	60	0	0	0	∞	24,89	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,94	2,9650	11,4024	6,2508	7,9143	60	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,96	10,0834	4,8200	3,0506	4,2307	60	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
387,98	11,9668	20,1115	2,7429	2,4749	60	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
388,00	2,7863	6,8344	6,2269	6,0682	60	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	1	0	1	0	0
388,02	2,5320	10,8732	9,2693	2,0831	60	1	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	2	0	1	0	1	0	0
388,04	8,6928	6,3241	15,5623	11,0909	60	1	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	2	0	1	0	1	0	0
388,06	2,9065	16,4095	2,9180	3,3975	60	1	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	2	0	1	0	1	0	0
388,08	2,1210	12,0947	10,2663	2,9333	60	1	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	2	0	1	0	1	0	0

388,10	2,5828	35,7111	7,5131	4,7552	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	2	0	1	0
388,12	3,0465	14,7932	17,8310	15,7443	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	2	0	2	0
388,14	10,3773	19,0834	12,0253	11,7528	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,16	11,8983	20,4474	13,6699	4,9273	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,18	4,1293	13,7417	14,9709	15,8375	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,20	9,3298	14,8379	7,5975	9,5834	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,22	11,4928	7,5519	13,4447	9,5186	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,24	12,5558	3,3092	20,4003	11,6029	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,26	9,5260	10,3708	1,6321	10,1864	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,28	4,1324	15,3811	9,4558	8,0148	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,30	20,0538	2,3006	6,9446	4,0591	60	1	0	0	0	600	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,32	5,1000	6,9871	10,5325	5,0670	60	1	0	0	0	∞	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,34	12,0141	1,3064	8,0705	2,2615	60	1	0	0	0	∞	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,36	2,4994	1,2203	7,1243	3,5869	60	1	0	0	0	∞	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,38	10,4890	2,9855	4,2856	5,8865	60	1	0	0	0	∞	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,40	8,9305	4,1350	8,8607	5,7307	60	1	0	0	0	∞	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,42	12,6396	13,2733	4,5647	4,4088	60	1	0	0	0	∞	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,44	12,5124	0,6037	3,0402	3,4427	60	1	0	0	0	∞	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,46	3,7520	4,1110	7,0892	0,3723	60	1	0	0	0	∞	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	1	1	0	2	0
388,48	3,5846	6,1996	8,4770	4,3558	60	1	0	0	0	∞	21,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	2	1	0	2	0
388,50	4,3386	6,7850	2,9536	3,4965	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	2	1	0	2	0
388,52	1,0662	8,6082	8,1774	5,8220	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	2	0
388,54	17,6198	9,0308	8,8607	8,5476	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	2	0
388,56	4,1014	8,9040	2,7997	9,5245	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	2	0
388,58	1,2674	24,4544	16,5535	9,0682	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	2	0
388,60	10,8310	24,8400	0,6759	2,4575	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	2	0
388,62	13,5638	47,7721	30,7805	12,3017	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	2	3	1	0	2	0
388,64	23,9531	43,7536	27,2202	14,4525	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	2	3	1	0	2	0
388,66	31,3476	45,8012	19,3358	9,4660	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	2	3	1	0	1	0
388,68	28,3647	47,1649	26,7873	9,0169	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	2	3	1	0	1	0
388,70	18,8158	27,2433	11,7506	11,6864	60	1	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	2	3	1	0	1	0

388,72	18.6034	41.0468	111.0791	8,2305	60	1	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	1	0
388,74	21.0869	51.1797	13.4447	8,8837	60	1	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	1	0
388,76	41.6365	30.8654	7,8211	4,2699	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	1	0
388,78	19.0128	30.9680	19,2991	9,6479	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	1	0
388,80	25.6823	17.9428	3,3633	3,0915	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	1	3	1	0	1	0
388,82	8,9394	14,4240	11,8957	4,5910	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	3	1	0	1	0
388,84	9,5590	10,6788	7,5975	4,3116	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	3	1	0	1	0
388,86	10,8759	1,5936	2,9536	4,9264	60	0	0	0	∞	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	3	1	0	1	0
388,88	3,4690	12,1200	6,7430	4,2462	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	3	1	0	1	0
388,90	8,5564	16,2308	13,9064	12,1748	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	0
388,92	10,3700	19,6252	15,3089	15,0105	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
388,94	9,7730	29,7745	41,4049	28,0745	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
388,96	18,0296	28,5836	37,9382	25,8335	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
388,98	17,1840	40,0351	45,4923	38,5286	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,00	28,6574	43,1686	50,8652	35,6632	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,02	25,2081	34,4855	33,8304	34,5213	60	0	0	0	300	20,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,04	18,6379	36,2862	34,1519	37,5320	60	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,06	26,0319	42,3288	32,6156	38,6572	60	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,08	16,7649	32,2718	31,0025	31,8181	60	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,10	17,1976	24,5811	28,4026	39,7990	60	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,12	19,4625	22,6796	26,7596	20,9546	60	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,14	21,7569	20,0597	23,4888	18,8758	60	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,16	14,4551	7,1292	12,2058	6,7389	60	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,18	10,0021	5,2921	10,8853	7,3205	60	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,20	15,4127	6,9602	28,1765	27,5874	60	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,22	8,0155	29,1317	6,9388	4,0815	60	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
389,24	2,4974	11,0894	9,9381	7,9158	60	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
389,26	4,8089	3,9116	10,5407	4,0044	60	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
389,28	3,0395	4,4068	5,6952	3,0883	60	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
389,30	11,2582	12,1069	4,1838	4,5942	60	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
389,32	13,0908	0,0605	5,8377	4,9142	60	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0

389,34	2,9914	3,5797	7,4509	2,1153	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
389,36	4,3154	4,5397	9,6526	38166	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,38	7,9512	9,4111	4,4073	6,5908	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,40	4,1688	2,7768	7,3088	3,6061	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,42	1,6031	17,5625	7,9591	2,1362	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,44	12,7477	2,6320	1,6717	5,7866	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,46	5,0663	5,0857	10,2077	2,1974	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,48	4,0533	2,1311	7,3088	1,9092	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,50	2,1145	8,5298	8,8720	3,0478	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,52	3,1822	1,2556	5,5835	4,0863	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,54	6,7435	3,8693	3,1348	3,2346	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,56	1,7620	9,9001	4,9637	2,3903	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,58	2,2013	6,4375	5,2525	5,4409	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,60	4,1126	0,4950	9,7918	4,2513	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,62	2,3781	2,6078	2,7209	3,2874	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,64	2,2846	1,6240	5,7664	1,1167	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,66	2,4471	0,7305	3,8664	3,4220	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,68	1,8893	8,9344	11,7702	6,4037	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,70	14,4148	13,0755	14,1140	4,4509	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	1	0	1	0
389,72	5,9351	21,1428	26,7634	25,5848	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	0
389,74	16,1582	26,9897	30,0515	30,7392	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	0
389,76	19,5323	25,7524	31,6011	34,4767	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	0
389,78	24,4804	29,1448	25,1502	25,8602	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	0
389,80	18,3716	14,5241	11,0316	7,6892	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	0
389,82	4,0596	11,5239	15,7866	11,2412	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	3	0	1	0
389,84	10,1568	4,4671	10,4502	4,0097	60	0	0	0	1	500	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	3	0	1	0
389,86	2,8790	0,9598	14,0502	6,6639	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	3	0	1	0
389,88	7,5324	4,4974	14,4447	3,2178	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	3	0	1	0
389,90	10,0753	25,3298	11,2151	13,4303	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	3	0	1	0
389,92	17,7385	9,1998	9,0602	4,3225	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	3	0	1	0
389,94	10,5623	25,2326	24,5688	21,4025	60	0	0	0	1	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	3	0	1	0

389,96	8,2167	6,2357	14,3966	4,2551	60	0	0	1	350	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
389,98	10,7588	5,9461	12,4985	6,6027	60	0	0	1	350	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,00	11,7290	21,4026	8,8411	8,4584	60	0	1	1	350	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,02	5,9461	15,2915	16,9879	13,3833	60	0	1	1	350	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,04	12,4113	25,6253	6,3261	13,6936	60	0	1	1	350	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,06	5,1009	18,8288	27,2781	22,5271	60	0	1	1	350	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,08	13,5381	38,1959	29,4233	34,4152	60	0	1	0	350	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,10	28,0884	20,0924	17,3289	24,7661	60	0	1	0	350	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,12	5,6524	27,2559	10,3510	13,7568	60	0	1	0	350	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,14	10,7514	15,2415	11,4880	16,3852	60	0	1	0	350	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,16	11,7655	16,7627	10,3348	15,9463	60	0	0	0	350	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,18	12,6811	9,1320	16,8992	8,8954	60	0	0	0	350	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	0
390,20	2,3846	7,3045	1,5023	4,2500	60	0	0	0	350	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	1
390,22	8,2803	5,6990	4,2470	1,9988	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,24	10,4917	18,6970	2,7196	16,0429	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,26	12,2726	21,7640	15,9245	26,1744	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,28	25,1890	21,7067	20,6615	22,5674	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,30	18,4561	19,9161	23,1975	31,4602	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,32	39,2604	30,2289	27,8990	25,2523	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,34	19,5971	22,3242	27,7047	22,6896	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,36	14,1742	32,8460	29,0354	37,8914	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,38	19,2005	28,8917	24,1564	25,7553	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,40	15,3855	27,2664	21,3178	15,0318	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,42	2,7425	24,7737	36,7537	16,3098	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,44	24,1586	28,0084	29,8319	36,8756	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,46	13,0874	26,9942	31,3983	23,4909	60	0	1	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,48	11,4676	30,8310	21,4952	21,5343	60	0	1	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,50	15,2002	20,6036	21,4065	15,5356	60	0	1	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,52	10,7915	23,3598	24,7055	26,6148	60	0	1	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,54	13,4254	26,4513	15,9066	19,3478	60	0	1	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,56	11,6366	25,2276	17,6976	19,7565	60	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2

390,58	20,1160	11,2053	12,8228	10,6554	60	1	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,60	14,2846	26,1634	8,2480	14,4599	60	1	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,62	48,192	0,8388	10,7800	5,7045	60	1	0	0	0	300	23,20	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,64	5,9742	3,2607	5,1010	2,4075	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,66	4,0806	10,8700	5,7220	4,9437	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,68	8,7169	6,8113	2,9164	2,9951	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,70	3,8715	8,0245	5,7551	1,4638	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,72	9,9543	4,9803	3,1825	0,9706	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,74	2,0404	3,3108	4,0696	3,8468	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,76	2,6038	5,9198	3,4944	5,1116	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,78	2,0545	1,0208	5,2540	3,0560	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,80	5,2968	9,5727	4,8677	5,8181	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,82	17,7900	12,5445	10,1186	9,0033	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,84	14,0177	3,8097	4,3444	10,5368	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	1	2	0	1	2
390,86	3,2411	4,3669	6,2391	10,8636	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	2	0	1	2
390,88	11,0887	2,3345	8,4332	7,5010	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
390,90	4,1748	5,2340	2,5116	10,5611	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
390,92	11,0626	4,2412	4,2995	4,9440	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
390,94	2,3511	4,9915	2,0080	6,3499	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
390,96	2,7662	3,3415	1,6551	1,0731	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
390,98	4,9939	4,3669	3,4487	8,9683	60	1	0	0	0	∞	23,25	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,00	11,9310	2,5921	5,5607	15,2387	60	1	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,02	12,7397	5,5487	1,5023	22,6236	60	1	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,04	3,3341	3,0685	15,8347	7,3988	60	1	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,06	5,2436	21,3509	15,0195	13,4320	60	1	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,08	11,8626	15,7923	20,5353	5,0438	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,10	1,9778	16,4086	14,6502	7,6837	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,12	15,0444	9,8403	24,1014	2,8721	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,14	10,2583	9,4724	27,7216	4,7329	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,16	11,5679	26,8848	19,1001	10,5258	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,18	8,0596	17,9046	27,5273	14,6435	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2

391,20	4,6775	18,0968	17,3259	6,1175	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,22	13,1900	26,8153	33,3821	17,3305	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,24	22,2111	34,6617	31,9457	29,1380	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,26	22,1719	30,5069	43,3342	16,3539	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,28	10,6313	26,8521	34,5253	22,9477	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,30	27,5272	37,1322	44,4173	30,9943	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,32	19,1963	23,5673	33,3102	9,0148	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,34	4,3043	9,8190	20,2533	2,8193	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,36	12,3609	7,6639	13,9805	8,4504	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,38	4,8531	12,0119	19,1888	3,8236	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,40	2,3177	3,7940	10,2461	8,2581	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,42	13,3002	0,7673	7,9002	10,3754	60	0	0	0	0	400	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	1	0	1	2
391,44	1,5901	3,8332	10,5133	9,0757	60	1	0	0	0	∞	23,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,46	4,2794	3,7368	9,1721	10,3020	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,48	4,5117	4,7629	16,0840	14,9508	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,50	2,7038	8,2800	9,5196	5,5728	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,52	2,6286	3,1452	9,6083	9,3977	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,54	18,5234	7,4976	6,0600	12,2769	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,56	10,9813	4,6181	4,3745	9,3201	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,58	5,7982	1,6240	6,1818	12,8377	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,60	10,2211	10,6800	6,7878	12,9151	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,62	2,3483	3,9177	2,9122	12,7440	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,64	11,5147	7,1957	9,3590	9,9558	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,66	3,2043	8,0166	2,3342	10,5167	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,68	9,5470	1,9317	14,2380	17,4927	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,70	20,7457	19,8000	7,3489	8,2831	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,72	16,1369	7,3742	5,8107	19,5407	60	1	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,74	4,3010	8,0950	10,8121	18,6128	60	1	0	0	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,76	2,1188	3,8755	6,2077	10,8930	60	1	0	0	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,78	5,9319	6,1996	10,3847	9,6222	60	1	0	0	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,80	6,3336	6,5647	9,7911	6,0301	60	0	1	0	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2

391,82	4,5033	12,6107	24,7055	10,7050	60	0	1	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,84	1,8614	6,9906	15,4630	2,3704	60	0	1	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,86	11,8931	3,2416	15,6404	1,6955	60	0	1	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,88	3,7127	16,2870	16,0840	14,5650	60	0	1	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	15	0	2	0	0	1	2
391,90	3,7831	2,2939	8,2962	5,8148	60	0	0	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
391,92	2,9992	14,8503	11,5676	6,6053	60	0	0	0	1000	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
391,94	1,8804	0,5614	8,8437	11,9209	60	0	0	0	∞	24,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
391,96	9,0450	2,0888	5,9593	7,8100	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
391,98	4,3826	7,6244	16,9850	6,8143	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
392,00	4,3918	4,2000	13,8842	8,2223	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
392,02	10,4687	2,8191	5,9713	2,1053	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
392,04	1,4498	12,2845	5,2917	9,3814	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
392,06	8,6376	2,4810	1,5023	4,6505	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
392,08	5,6545	4,2135	8,8968	6,6388	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
392,10	1,6862	6,1405	3,0009	4,8111	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	0	0	1	2
392,12	2,2194	4,4068	4,4921	5,9251	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,14	1,1832	1,1288	4,3444	3,1170	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,16	0,8047	1,0382	3,3970	3,0463	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,18	2,9279	11,3971	4,3444	9,8495	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,20	0,7938	5,7348	2,9552	1,4385	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,22	1,6552	5,8074	1,1810	5,4360	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,24	8,9081	3,8755	1,1405	1,9832	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,26	1,3380	1,2014	1,4370	1,5277	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,28	2,8483	1,8833	0,6457	4,3777	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,30	3,1632	0,7727	10,5873	0,7426	60	0	0	0	∞	2,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
392,32	4,5468	3,7487	5,5058	2,8561	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	1	0	1	2
392,34	3,7862	2,4388	3,8922	6,1002	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,36	2,9903	8,6505	3,3970	7,4109	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,38	17,4343	23,4825	6,8583	10,9000	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,40	20,3480	21,7922	24,9548	22,5495	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,42	24,8020	43,5543	22,9172	24,4199	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2

392,44	18,1704	37,3426	20,4466	16,4418	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,46	4,4906	10,7936	27,1301	14,2821	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,48	19,0496	25,3721	28,0764	24,9861	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,50	13,4677	19,5104	20,8911	8,3850	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,52	15,9561	33,3705	23,8016	30,6012	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,54	15,6095	19,7216	28,9467	22,2935	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,56	33,1578	20,7358	23,0032	13,4328	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,58	15,0012	23,6515	21,3743	22,1661	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,60	9,2199	16,6792	21,8731	19,2101	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,62	13,6210	24,1586	16,5150	25,8920	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,64	13,9584	20,8507	19,5436	16,7202	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,66	15,3222	24,6537	12,8707	17,5352	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,68	18,5231	38,8942	26,5852	19,2097	60	1	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,70	11,6316	32,3022	34,1973	30,6946	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,72	6,3053	12,4839	15,5517	19,1880	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,74	16,7331	13,1600	11,9233	16,8818	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,76	11,8003	30,3161	30,5289	19,7269	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,78	13,8245	17,0476	27,7277	18,6495	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,80	17,3465	18,2730	30,4152	14,5896	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,82	13,5485	20,5126	17,6089	14,1274	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,84	2,0983	4,2016	4,3444	2,8048	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,86	3,1923	5,5054	4,3444	5,8341	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,88	3,9477	7,8718	2,6890	4,5974	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,90	3,3251	0,1811	5,1341	3,0678	60	0	0	0	400	23,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	1	0	1	2
392,92	0,5035	3,8636	3,2416	10,3745	60	0	0	0	∞	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
392,94	1,6179	3,7910	2,4407	2,2787	60	0	0	0	∞	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
392,96	2,9734	9,5259	6,8464	8,1005	60	0	0	0	∞	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
392,98	10,6512	13,5099	9,4309	12,4831	60	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,00	10,4763	12,9028	17,9755	9,4671	60	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,02	11,1971	6,1996	9,0812	7,5557	60	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,04	3,5245	16,5828	16,8226	21,2819	60	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2

393,06	7,1599	20,0597	3,3970	13,8406	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,08	9,9049	14,4396	16,6803	11,8057	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,10	13,4370	21,9805	20,6120	16,4622	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,12	28,2701	19,3717	28,5774	20,7285	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,14	20,8070	26,6821	25,5757	25,0899	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,16	10,2642	17,3011	15,8752	17,0719	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,18	11,1600	10,2443	8,0115	9,9226	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,20	6,6243	2,3108	2,4496	1,9848	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,22	4,9482	9,3569	8,0115	8,4057	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,24	3,5757	2,8129	0,9523	8,6935	60	0	0	0	0	500	24,80	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,26	3,0665	4,3764	6,1233	4,2830	60	0	0	0	0	∞	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,28	2,4467	0,4888	6,1385	5,7504	60	0	0	0	0	∞	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	1	2
393,30	2,0664	10,2000	6,3457	1,9736	60	0	0	0	0	1500	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,32	3,6581	13,4135	10,5841	8,9171	60	0	0	0	0	1500	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,34	9,0611	12,3571	9,9631	9,8582	60	0	0	0	0	1500	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,36	2,2416	1,9099	10,3179	2,3080	60	0	0	0	0	1500	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,38	3,2438	30,2012	15,3743	29,4185	60	0	0	0	0	1500	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,40	16,6109	17,8201	18,2130	22,6746	60	0	0	0	0	1500	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,42	10,6224	6,1996	8,3950	8,4501	60	0	0	0	0	1500	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,44	9,0048	4,8474	6,3243	3,0025	60	0	0	0	0	1500	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,46	9,9824	2,2275	1,4346	2,2585	60	0	0	0	0	∞	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,48	2,0827	3,4833	6,7477	5,5874	60	0	0	0	0	∞	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,50	3,2416	14,5200	1,5023	8,5922	60	0	0	0	0	300	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,52	12,1819	6,9567	5,0623	4,5738	60	0	0	0	0	300	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,54	11,9627	12,3149	3,3100	11,2742	60	1	0	0	0	300	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,56	3,6101	6,7370	5,4541	6,0282	60	1	0	0	0	300	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,58	2,6945	26,8088	12,3533	17,4969	60	1	0	0	0	300	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,60	30,0766	39,7200	28,9645	30,5372	60	1	0	0	0	300	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,62	15,8926	38,3145	31,6106	33,4354	60	1	0	0	0	300	23,70	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,64	21,1302	31,8796	37,9949	23,3780	60	1	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
393,66	19,2308	37,3729	26,2854	32,2259	60	1	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	1	2

393,68	18,1603	34,0043	22,0274	18,7185	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	1	2
393,70	18,6934	30,7928	26,8177	30,1105	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	1	2
393,72	16,7074	28,6377	36,1320	39,2880	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	1	2
393,74	10,3407	30,2012	34,6602	30,8262	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	1	2
393,76	21,8626	27,5272	27,9716	30,1646	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	1	2
393,78	11,5239	20,5971	32,0567	21,3020	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	1	2
393,80	12,0169	23,7783	26,4488	22,3320	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	1	2
393,82	14,1742	28,2878	33,7128	28,0909	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
393,84	16,9327	17,0595	25,5926	17,4443	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
393,86	3,4107	14,4277	24,7774	19,7943	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
393,88	6,0024	29,5977	22,4878	38,2532	60	1	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
393,90	21,0316	25,8066	26,7290	20,6891	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
393,92	12,1296	25,4144	20,5810	24,1092	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
393,94	12,0613	33,4008	26,2816	28,8012	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
393,96	11,4112	30,9618	23,9645	29,8850	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
393,98	22,6514	35,3446	26,9064	28,0387	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,00	17,0617	23,8205	20,1418	21,4579	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,02	9,6858	29,8209	26,2287	31,4513	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,04	15,6791	31,4993	24,6144	22,5764	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,06	14,8903	26,3559	19,8314	28,8083	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,08	15,9045	19,7216	34,2088	23,3020	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,10	14,4966	18,1159	16,7328	23,6005	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,12	16,7800	20,6090	21,2053	11,7944	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,14	21,2006	15,1157	20,5599	5,1396	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,16	10,4393	19,1301	10,9052	6,6075	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,18	9,9723	9,0308	11,8597	4,2218	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,20	10,4675	3,1875	5,2853	3,7097	60	0	0	0	300	21,40	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	1	2
394,22	2,9199	4,7510	6,6038	3,9202	60	0	0	0	∞	23,29	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	1	0	2	2
394,24	1,6381	8,7231	3,3348	4,2959	60	0	0	0	∞	23,29	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,26	4,5115	3,3504	6,6001	2,2315	60	0	0	0	∞	23,29	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,28	3,5087	3,9177	3,3668	5,5798	60	0	0	0	∞	23,29	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2

394,30	1,6782	4,7629	8,4052	8,6959	60	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	3	0	0	2	2
394,32	3,1593	13,4677	6,0723	9,5380	60	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,34	11,3200	17,3975	4,3394	12,0316	60	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,36	19,4822	20,1019	12,8539	11,1541	60	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,38	17,4037	21,1584	11,4367	10,6657	60	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,40	11,9324	37,7729	22,4776	12,9888	60	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,42	24,8065	45,6490	18,1684	28,6948	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,44	27,7785	53,2273	6,2313	9,2181	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,46	24,0318	36,7098	14,2512	15,4478	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,48	22,6373	53,5925	15,0484	13,1543	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,50	29,0625	52,4400	18,2370	22,9747	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,52	23,1607	34,5959	17,5128	14,4975	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,54	24,4121	58,3132	20,1857	13,8263	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,56	34,6100	63,5596	19,6941	9,3185	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,58	42,6547	45,8689	10,4425	14,4960	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,60	26,4686	29,9526	12,8529	14,9555	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,62	19,1745	33,0205	11,0625	9,8318	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,64	19,6393	38,7251	15,8560	12,6025	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,66	21,3296	29,5555	10,3539	19,4364	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,68	26,0764	28,8449	11,6488	8,0921	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,70	22,9917	16,8966	11,6455	12,6793	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	2	2
394,72	9,9063	11,8258	7,4009	5,8879	40	0	0	0	0	300	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
394,74	12,9346	3,1149	2,8250	1,3126	40	0	0	0	0	∞	23,29	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	2	0	0	1	2
394,76	2,0606	12,7374	9,1337	7,0899	40	1	0	0	0	∞	21,54	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,78	7,9641	17,8201	13,7988	10,6064	40	1	0	0	0	350	21,54	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,80	11,0450	25,0800	11,7024	15,8502	40	1	0	0	0	350	21,54	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,82	16,5383	31,4267	20,7171	18,6961	40	1	0	0	0	350	21,54	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,84	18,3835	35,1030	33,1376	23,9312	40	1	0	0	0	350	21,54	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,86	21,2429	45,3943	40,6144	15,6519	40	1	0	0	0	350	21,54	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,88	27,4827	48,7489	39,2492	18,2382	40	1	0	0	0	350	21,54	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,90	30,4829	36,0326	37,8320	21,3311	40	0	0	0	0	350	21,54	26,94728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2

394,92	18,2026	35,4291	32,5862	24,0981	40	0	0	0	350	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,94	16,4278	32,8211	37,1921	17,3315	40	1	0	0	350	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,96	27,5391	46,8322	37,7435	30,0614	40	1	0	0	350	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
394,98	32,9620	32,6521	37,7235	19,7754	40	1	0	0	350	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
395,00	21,1183	26,1750	25,5014	11,1127	40	1	0	0	350	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
395,02	16,4419	23,8931	23,4468	16,7603	40	0	0	0	350	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
395,04	15,4700	14,9348	2,9552	10,6802	40	0	0	0	350	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
395,06	9,8900	3,8152	6,8364	2,4786	40	0	0	0	350	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
395,08	3,5898	2,0404	2,2050	1,2987	40	0	0	0	∞	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
395,10	0,5253	11,6400	8,6572	5,5331	40	0	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	1	2
395,12	3,9340	21,0480	11,2837	12,1055	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,14	11,9064	20,4782	11,7541	17,4203	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,16	10,7232	32,6160	18,9563	22,2710	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,18	17,1039	23,3134	23,3749	13,5874	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,20	4,6101	24,4847	19,1001	24,3566	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,22	14,1015	37,1616	26,0361	32,3407	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,24	16,2707	25,2453	20,9611	17,0912	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,26	18,8202	29,2597	32,9513	21,4860	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,28	8,2458	28,4966	28,4861	25,3036	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,30	22,5106	23,0599	21,7925	32,9578	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,32	19,2449	18,7522	23,3749	26,1139	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,34	19,4540	24,9495	21,6894	29,1348	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,36	14,0311	33,7085	22,9145	31,1057	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,38	17,7497	24,5389	28,7142	32,6062	40	1	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,40	15,9208	24,5389	23,7297	19,5900	40	0	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,42	13,8621	33,2818	20,8065	25,2482	40	0	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,44	21,0738	19,0197	15,2863	11,6606	40	0	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,46	15,7355	6,6222	11,0334	5,7619	40	0	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	0
395,48	11,0872	16,2989	5,4171	1,1282	40	0	0	0	300	21,54	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	3	1	0	1	0
395,50	10,5238	24,3760	5,4541	9,3687	40	0	0	0	300	22,30	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	3	1	0	1	0
395,52	17,6792	34,8351	16,5444	6,2874	40	0	0	0	300	22,30	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	1	0	2	1

395,54	11,8901	45,1034	21,6894	21,7979	40	0	0	0	0	300	22,30	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	1	0	2	1
395,56	37,3285	35,6101	12,8707	14,9809	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	1	0	2	1
395,58	35,9600	47,9374	13,9658	12,0041	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	1	0	2	1
395,60	33,2719	55,2544	25,3342	14,3201	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	3	2	1	0	2	1
395,62	38,1195	44,0400	11,2032	16,9674	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	3	2	1	0	2	1
395,64	27,2151	46,7953	27,4386	19,3240	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	3	2	1	0	2	1
395,66	35,9503	53,6400	25,3096	17,3154	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	1	0	2	1
395,68	28,7223	44,8921	13,8180	19,8038	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	1	0	2	1
395,70	28,2315	56,3227	16,8824	9,6762	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	1	0	2	1
395,72	30,2879	47,5522	26,7290	18,4900	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	1	0	2	1
395,74	26,6376	52,5553	16,5275	16,3262	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	1	0	2	1
395,76	33,6381	47,6806	22,1644	17,6955	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,78	34,4550	55,0800	30,2191	12,7196	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,80	31,2035	46,4605	20,7558	12,1082	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,82	32,2577	34,7108	17,5920	20,0517	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,84	34,1974	44,3428	21,7613	22,6063	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,86	28,3145	34,7083	20,4644	17,1327	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,88	24,5270	17,8927	10,0687	20,4418	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,90	30,1893	6,1877	3,1326	3,8066	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,92	16,1461	15,1038	2,6613	9,6963	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,94	5,1595	20,9352	10,0418	11,0354	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	2	1
395,96	11,7233	12,8642	14,3125	19,7869	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	2	0	0	1	1
395,98	19,1477	43,7114	20,1096	22,5546	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	1
396,00	16,2306	62,2800	34,7667	19,6737	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	1
396,02	47,9229	31,3303	21,6894	33,1808	40	0	0	0	0	300	16,85	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	1
396,04	20,7640	33,8775	29,0354	33,7399	40	0	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	1
396,06	20,8907	46,7953	27,9709	30,2609	40	0	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	1
396,08	36,9644	35,3869	34,0316	31,4974	40	0	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	1
396,10	15,3996	38,9225	34,1804	27,0333	40	0	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	1
396,12	31,2436	26,2291	34,6697	27,5084	40	0	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	1
396,14	23,7078	34,4691	24,1564	43,5148	40	0	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	1	1

396,16	27,5672	35,0066	39,1649	34,7114	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,18	21,0760	38,6554	22,3823	23,3242	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,20	25,5530	43,5805	40,7448	38,3897	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,22	26,2432	37,9223	23,9790	42,8673	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,24	22,6232	39,4554	32,7618	28,4060	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,26	27,4990	39,9202	23,9209	31,5337	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,28	18,6674	40,3309	36,5352	19,1502	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,30	20,6372	40,9828	34,9436	20,3016	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,32	26,2862	23,7360	46,9759	21,3291	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,34	28,0215	31,3725	24,6000	22,1597	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,36	22,5246	27,7504	21,3178	29,4211	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,38	13,6367	33,2437	18,0356	25,3646	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	0	1	1	1
396,40	17,6633	29,1448	22,3444	23,8025	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	0	1	1	1
396,42	25,1795	30,3600	16,9870	20,1232	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	0	1	1	1
396,44	23,0858	14,3953	20,3174	25,1605	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	0	1	1	1
396,46	8,8626	14,2972	12,4832	13,6047	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	0	1	1	1
396,48	14,5002	9,2421	6,6759	7,8036	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	0	1	1	1
396,50	2,1627	3,4890	3,3970	5,3773	40	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	0	0	0	1	1	1
396,52	0,6732	0,7424	3,8035	2,2902	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,54	2,1300	5,2096	3,8035	2,3712	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,56	1,5831	3,5374	2,7778	4,2067	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,58	2,7077	2,5233	2,3628	4,6592	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,60	5,5191	3,5313	2,8259	2,5619	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,62	1,5575	12,9040	3,0642	1,2443	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,64	3,0144	1,0021	1,7133	5,7341	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,66	1,6587	2,5114	1,0923	0,1986	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,68	3,8148	1,2437	2,4496	1,3811	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,70	3,1932	3,3565	6,3042	2,6447	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	0	0	0	1	1	1
396,72	2,5400	4,2862	1,5023	2,5765	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	0	1	1	1
396,74	3,8077	2,7649	5,2917	3,9806	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	0	1	1	1
396,76	0,9165	0,8330	3,1637	3,1930	40	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	0	0	1	1	1

396,78	2,8835	2,8613	4,6690	2,8779	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,80	10,1226	24,6234	9,2762	2,5473	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,82	9,6473	36,9623	17,5033	5,6417	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,84	14,8949	39,8661	23,9790	12,5585	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,86	25,2777	33,6929	35,9546	9,2184	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,88	19,8624	33,9465	29,4789	4,7601	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,90	30,5969	35,1756	32,3176	1,0315	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,92	18,9014	39,3590	30,7216	11,2347	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,94	20,9798	33,4431	30,1608	8,4825	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,96	10,7800	12,1458	18,0382	1,6400	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
396,98	7,2857	1,0747	2,6890	11,1868	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
397,00	3,5776	3,0546	3,4361	4,8335	40	0	0	0	1000	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	1
397,02	3,2679	1,9621	5,2853	2,9304	60	0	0	0	∞	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	2
397,04	0,7867	3,4107	6,6337	7,5664	60	0	0	0	∞	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	2
397,06	2,9653	4,3223	2,5593	2,0599	60	0	0	0	∞	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	2
397,08	1,6710	2,7284	2,0174	1,1988	60	0	0	0	∞	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	2
397,10	3,0185	5,2942	4,2534	2,7107	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	2	1	1	1	0	1	1	2
397,12	9,2207	15,4702	4,8312	9,2643	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,14	10,5407	19,8365	11,4367	18,7516	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,16	19,9216	32,9335	21,7114	17,8083	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,18	20,8871	22,6254	23,3744	20,4394	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,20	17,1032	38,1311	21,9572	26,0085	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,22	29,4570	44,6722	36,6668	28,5396	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,24	23,8303	29,1026	30,1653	29,2043	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,26	30,5902	39,1054	39,6283	40,5075	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,28	23,7474	31,2035	29,5660	27,5728	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,30	22,0411	28,3842	35,5279	26,5511	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,32	12,7878	34,0043	25,3230	35,8558	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,34	28,2310	29,1026	25,8545	28,0856	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,36	29,9829	28,6800	31,7004	29,8878	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2
397,38	22,6669	26,5672	21,7800	21,8262	60	0	0	0	300	18,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	1	2

397,40	22,4611	14,2283	20,2942	23,4885	60	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	2
397,42	17,7083	18,6652	15,4085	13,6425	60	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	2
397,44	21,7560	16,7858	16,6605	12,0566	60	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	2
397,46	4,4973	5,7543	6,7660	7,5343	60	0	0	0	0	300	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	2	0	1	2
397,48	2,4614	4,3373	2,0278	6,2648	60	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	1	0	1	2
397,50	3,3604	11,2657	2,3821	2,5307	60	0	0	0	0	∞	18,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	1	0	1	2
397,52	5,0376	2,7441	4,3394	3,2462	60	0	0	0	0	∞	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,54	4,1533	6,3335	1,9780	1,3189	60	0	0	0	0	∞	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,56	15,8571	20,3289	4,7050	8,0572	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,58	19,3745	23,7462	16,0826	13,9212	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,60	29,5876	39,2895	27,0694	25,0607	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,62	24,4068	35,1268	39,2885	31,3504	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,64	20,4191	29,5183	23,5515	28,5715	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,66	19,9311	31,2802	33,6637	31,1421	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,68	25,9180	35,5504	26,3859	24,4688	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,70	24,2425	50,8037	41,2313	30,5749	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,72	29,5052	47,2896	41,6208	31,0825	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,74	24,3805	36,6344	36,3063	31,4759	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,76	20,4061	28,3079	21,9235	25,3760	60	1	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,78	23,6009	32,7332	31,8482	43,0380	60	1	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,80	26,4049	44,7015	31,9944	25,2010	60	1	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,82	17,0574	25,1662	34,2890	19,7163	60	1	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,84	24,3584	39,1087	27,8917	49,7387	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,86	14,9137	25,6846	23,9058	36,5858	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,88	18,7056	21,5148	35,2634	41,8064	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,90	14,8588	32,6457	30,0175	37,7421	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,92	10,6023	27,6345	26,9301	28,2136	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,94	10,8348	28,8262	18,8441	27,1777	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,96	16,5007	33,0464	24,8208	27,5948	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
397,98	21,8247	36,3301	24,4373	30,5544	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
398,00	26,4554	22,5488	31,8245	18,6430	60	0	0	0	0	350	22,50	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2

398.02	13.7706	21.8569	15.2656	11.3757	60	0	0	0	0	350	22.50	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	0	0	0	0	2
398.04	7.6174	6.8246	6.4085	11.3594	60	0	0	0	0	350	22.50	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	0	0	0	0	2
398.06	1.6293	4.6722	3.2648	7.2240	60	0	0	0	0	∞	22.50	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
398.08	9.9267	31.7155	3.5640	19.0547	60	0	0	0	0	700	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
398.10	12.9287	29.3779	14.0798	19.6278	60	0	0	0	0	700	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
398.12	30.2629	22.7727	31.9067	26.8419	60	0	0	0	0	700	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
398.14	20.1998	24.3664	28.9555	14.6199	60	0	0	0	0	700	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
398.16	11.2180	24.2717	14.6434	23.8076	60	0	0	0	0	700	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
398.18	16.6506	21.5148	13.6655	26.5477	60	0	0	0	0	700	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
398.20	18.5339	18.3316	19.9007	13.5346	60	0	0	0	0	700	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	1	1	0	0	0	2
398.22	12.7481	3.9198	6.9984	3.7041	60	0	0	0	0	∞	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	2	1	0	0	0	2
398.24	2.8856	5.4806	2.9384	2.4235	60	0	0	0	0	∞	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	2	1	0	0	0	2
398.26	3.2978	5.0506	2.5862	1.4230	60	0	0	0	0	∞	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	2	1	0	0	0	2
398.28	6.9187	6.9129	2.4958	6.2354	60	0	0	0	0	∞	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	2	1	0	0	0	2
398.30	3.9675	13.9738	2.7656	5.2324	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.32	12.8796	22.1841	7.7984	12.1364	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.34	22.2122	35.0911	17.8561	15.3371	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.36	32.7576	36.1103	23.6343	13.3479	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.38	41.3476	47.1827	10.0208	10.8014	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.40	24.2557	34.4548	16.6931	24.1377	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.42	31.0128	51.3680	25.4767	19.7565	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.44	41.6250	39.0151	12.6719	19.9032	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.46	33.5219	47.5307	19.3692	19.7045	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.48	29.8235	35.1541	16.8657	19.7147	60	0	0	0	0	300	20.81	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.50	26.9886	42.0941	15.1767	18.3117	60	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	3	1	0	0	0	2
398.52	40.6663	33.5674	15.8879	27.8513	60	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	0	1	1
398.54	38.1559	46.9084	10.2875	22.0104	60	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	0	1	1
398.56	28.0530	34.4017	20.1549	28.8899	60	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	0	1	1
398.58	22.0935	37.1528	21.6954	28.3284	60	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	0	1	1
398.60	24.8917	41.0973	23.5917	20.5485	60	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	0	1	1
398.62	33.8399	39.1357	24.9252	21.3218	60	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	0	1	1

398.64	30.9138	25.1448	12.6877	37.6896	60	0	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	1	1
398.66	23.2345	22.3262	18.4784	16.8869	60	0	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	1	1
398.68	5.6605	15.2172	6.2501	5.8077	60	0	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	1	1
398.70	5.9842	9.2772	7.1995	3.7098	60	0	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	1	1
398.72	9.6754	2.7898	2.4526	1.4931	60	0	0	0	0	0	∞	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	1	1
398.74	4.3464	2.2384	2.9981	3.1554	60	0	0	0	0	0	∞	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	1	4	1	0	1	1
398.76	0.9990	4.0275	2.7930	3.9305	60	0	0	0	0	0	∞	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	4	1	0	1	1
398.78	3.4279	1.4386	5.6665	1.1167	60	0	0	0	0	0	∞	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	4	1	0	1	1
398.80	0.5746	7.7597	1.6843	5.3004	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	4	1	0	1	1
398.82	10.0345	12.3326	2.4526	3.1825	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
398.84	11.9548	20.8472	11.0875	6.4359	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
398.86	18.1104	23.1144	21.2216	8.4602	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
398.88	25.8308	15.8389	20.5104	6.4862	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
398.90	23.0688	22.2141	35.6805	7.6061	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
398.92	18.8667	24.4411	21.7249	9.7547	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
398.94	18.7587	23.1325	26.0215	3.2075	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
398.96	27.8300	29.6519	37.9058	18.0278	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
398.98	13.6319	24.8769	28.1554	15.3846	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.00	23.2331	43.8000	27.7698	10.8793	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.02	31.9530	34.9762	44.1895	23.1481	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.04	14.8163	38.2722	31.5233	18.1615	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.06	19.9662	17.6088	38.0978	2.6944	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.08	28.3891	31.9641	38.0751	12.0271	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.10	23.9666	30.6205	34.3592	11.3078	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.12	25.8681	34.9221	38.5809	19.6459	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.14	34.9624	42.6127	36.0406	16.9079	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.16	38.2854	31.0464	38.6093	16.1313	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399.18	34.3907	17.6933	36.0406	12.4153	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399.20	9.1417	40.6800	27.9880	17.0315	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399.22	24.0082	23.5128	26.7402	8.3443	60	0	0	0	0	0	450	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399.24	26.6288	48.6964	27.7625	10.0032	60	0	0	0	0	0	300	2.00	2694728.9	978890.3	2265023.5	1398215	45	0	2	1	0	1	1

399,26	28,9293	47,1670	28,3164	5,7601	60	0	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,28	18,8812	40,8154	34,6249	7,7730	60	0	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,30	32,2294	31,6326	35,7205	13,9844	60	0	0	0	0	300	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	3	1	0	1	1
399,32	25,6374	36,9504	37,1035	10,5456	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,34	20,7495	42,4014	38,3934	18,8440	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,36	14,6545	23,2593	24,6144	18,2145	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,38	8,3430	21,2068	17,5484	22,8416	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,40	7,6023	13,3659	9,1337	2,5827	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,42	9,7455	13,8299	6,7231	5,1785	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,44	4,8598	3,2236	0,8788	7,3793	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,46	10,3719	1,5756	2,5952	3,2116	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,48	4,1927	8,0047	2,4208	2,4869	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,50	3,9350	30,7157	7,1772	17,8594	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,52	27,2172	19,2991	16,4655	15,1399	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,54	13,7778	14,1861	14,5169	7,5875	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	0	1	1
399,56	3,5088	28,5594	23,9944	15,5555	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	1	1	2
399,58	15,0312	17,8927	11,1087	16,6369	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	1	1	2
399,60	10,1457	19,0033	13,1349	16,3949	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	1	1	2
399,62	6,1330	21,7922	14,3989	13,0530	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	1	1	2
399,64	15,6509	15,2728	19,1228	19,4036	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	1	1	2
399,66	8,4511	7,4197	11,1710	15,3427	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	1	1	2
399,68	4,3326	10,6949	5,6594	6,8154	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	2	1	1	1	2
399,70	10,2139	2,5536	3,5723	2,9576	60	0	0	0	0	700	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	1	1	2
399,72	1,3282	1,7988	3,5723	4,7940	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	1	0	2
399,74	4,8024	1,8410	9,0691	4,2151	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	1	0	2
399,76	3,0524	3,0546	3,7200	9,7953	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	2
399,78	5,9190	7,6043	5,4873	7,2139	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	2
399,80	1,8269	3,6166	2,7879	11,1505	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	2
399,82	2,3424	11,3126	3,5723	3,8913	60	0	0	0	0	∞	2,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	2
399,84	9,5032	2,0827	6,2313	3,0732	60	0	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	2
399,86	1,6460	4,1110	2,9523	4,7623	60	0	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	2

399,88	8,9986	5,1370	1,2307	2,7796	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	0	2
399,90	4,5454	4,7026	9,5068	3,9186	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	0	2
399,92	10,6000	4,7145	6,7790	2,2941	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	0	2
399,94	6,3675	0,6882	3,3348	6,5433	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	0	2
399,96	8,1200	9,2240	6,1692	10,5705	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	0	2
399,98	12,4708	1,2494	4,4581	5,7911	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	0	2
400,00	6,9200	11,8800	0,5668	1,9828	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	1	0	0	2
400,02	11,1243	1,8353	9,1238	3,2109	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,04	5,2905	4,9138	3,5619	1,7440	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,06	8,3600	2,7707	2,4571	4,5983	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,08	8,2800	2,6862	7,3945	3,3238	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,10	5,9575	5,4209	1,3984	6,4730	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,12	11,2400	1,5395	4,4801	5,4046	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,14	8,6111	7,2802	4,2753	1,2776	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,16	10,9684	2,1852	3,5619	0,6923	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,18	3,4308	2,9819	1,8840	0,1824	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,20	8,2615	1,8894	3,4892	1,6081	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,22	4,9275	3,7307	1,8840	3,1368	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,24	13,3582	9,6105	1,4491	6,4709	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,26	6,2479	4,5516	3,8169	5,4074	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,28	10,0400	7,6564	2,8980	2,7102	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,30	16,2800	8,7502	4,0806	3,6889	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,32	4,0828	3,7003	5,3143	2,6971	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,34	6,1717	1,4972	4,3619	3,0267	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,36	6,8400	6,4732	1,0649	2,2900	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,38	8,9710	3,6101	4,3619	4,2184	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,40	11,2737	4,0564	1,5048	4,5727	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,42	7,9640	2,7584	2,1785	1,3201	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,44	3,4315	6,6133	3,7096	1,0898	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,46	3,7717	3,7862	1,2673	4,4168	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2
400,48	4,4305	5,3130	2,4571	5,8925	60	0	0	0	∞	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	2

400,50	6,2543	2,7197	4,5143	2,7523	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,52	0,1201	1,6195	3,3835	1,6170	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,54	1,6833	3,7862	8,3238	9,5195	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,56	0,5301	2,1726	4,3619	3,8258	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,58	5,5161	5,3464	5,6304	3,0749	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,60	9,1452	5,2782	3,7392	3,0230	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,62	3,0061	9,7833	3,7096	2,5020	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,64	5,0599	8,3639	3,4727	12,7947	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,66	1,3469	3,0856	4,3619	9,9274	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,68	6,9856	0,8470	3,5619	5,0042	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,70	8,0541	1,0397	6,4190	3,4666	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,72	4,9764	5,0779	3,4095	8,2964	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,74	6,7762	3,5523	2,7593	5,1311	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,76	7,6935	3,5523	4,2612	4,3327	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,78	9,2003	7,6387	2,3171	4,7267	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,80	7,9548	6,0348	2,9392	3,1391	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,82	4,9269	4,2781	5,1671	5,7783	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,84	2,4539	5,7764	3,5619	3,2936	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,86	6,9677	1,6195	2,4571	4,6413	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,88	3,8618	1,6141	3,7628	5,1237	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,90	2,2680	5,3464	3,2944	6,3238	60	0	0	0	0	0,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,92	6,7977	6,3737	4,9776	3,2543	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,94	1,5371	6,4555	8,2673	6,2479	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,96	6,0677	3,4704	4,0833	6,4347	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
400,98	3,4898	4,3248	2,5974	3,0208	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
401,00	2,1597	3,7375	1,2201	6,7252	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	2
401,02	1,3428	5,7750	9,1284	0,7826	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	1
401,04	4,1909	2,7639	2,4829	3,5951	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	1
401,06	1,8233	5,7297	6,4993	3,5742	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	1
401,08	7,5082	7,2280	2,4312	1,5085	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	1
401,10	1,9051	3,9402	2,4177	4,3210	60	0	0	0	0	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	1

401,12	10,6092	6,5022	1,5214	3,5951	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	1
401,14	1,6802	14,4610	7,1175	1,6291	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	1
401,16	3,8903	3,7605	4,4230	1,1011	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	1
401,18	2,7168	3,4560	2,5839	0,9041	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	1
401,20	5,8194	6,0797	5,3310	3,8856	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	1
401,22	8,7548	1,5609	2,4829	1,9721	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	1
401,24	3,7138	6,3213	1,3440	1,8566	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	1
401,26	10,9323	1,7419	2,3146	3,0160	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	1
401,28	15,3462	4,3054	6,4240	8,5170	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	0	0	0	0	0	1
401,30	11,3794	5,5955	1,8649	4,8639	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	0	0	0	0	1
401,32	2,5994	2,1597	6,0508	6,1839	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	0	0	0	0	1
401,34	8,9774	8,5550	5,3310	0,7826	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	0	0	0	0	1
401,36	3,4537	5,6422	3,5341	5,5271	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	0	0	0	0	1
401,38	1,2589	9,6819	1,5335	3,0670	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	0	0	0	0	1
401,40	1,9631	2,9607	4,3816	1,4857	60	0	0	0	0	∞	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	0	0	0	0	1
401,42	2,8577	8,5808	2,8143	2,7520	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	1
401,44	2,8174	11,0850	2,4038	5,8635	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	1
401,46	7,8397	3,2838	7,6453	4,1412	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	1
401,48	7,2290	18,2923	9,0732	9,5489	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	1
401,50	6,6858	7,0744	4,3816	4,7846	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	1
401,52	3,9601	9,7853	3,6512	20,0111	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	1
401,54	13,7779	21,7002	7,5620	10,4096	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	1
401,56	13,1087	12,7548	9,4288	14,4599	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	0
401,58	14,7685	12,2593	14,0897	16,6766	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	0
401,60	2,4367	24,0987	18,1139	11,8181	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	0
401,62	13,9670	11,7424	9,4672	12,9620	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	0
401,64	13,9495	12,7102	14,8356	15,3596	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	0
401,66	12,5323	12,3885	11,2956	3,1911	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	0
401,68	6,7148	24,6496	15,7404	8,7356	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	0
401,70	2,0039	7,5238	9,1284	6,2050	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	0
401,72	5,6938	11,7222	7,7398	5,0014	60	0	0	0	0	500	3,00	26947289	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0	0

401,74	6,9385	16,3558	9,5177	15,4447	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,76	3,7800	5,9501	10,2741	10,1461	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,78	10,4290	6,2143	7,1218	9,3583	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,80	7,9548	14,0198	8,4552	13,2221	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,82	10,7057	23,8280	4,3816	2,3271	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,84	2,3053	29,7238	13,4291	10,3408	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,86	3,4358	19,4818	13,8753	14,8287	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,88	7,8806	22,0563	24,4521	17,7326	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,90	13,5503	12,9457	11,2956	11,3295	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,92	10,4774	20,0188	12,9870	45,7826	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,94	22,8760	18,7920	30,1047	27,5544	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,96	20,0424	12,6226	19,7859	12,7992	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
401,98	8,7920	11,6929	6,9397	11,0110	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
402,00	6,4147	7,2847	12,8793	14,4796	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
402,02	8,1207	1,6782	8,8938	9,2115	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
402,04	7,9046	6,2841	8,1037	9,8049	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
402,06	3,8007	3,1030	3,8713	2,5473	60	0	0	0	0	500	3,00	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	0	1	1	0	0	0
402,08	1,6861	2,8613	1,9963	5,2268	60	0	0	0	0	∞	2,60	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	1	1	0	0	0
402,10	7,0875	10,2000	3,2756	6,9361	60	0	0	0	0	500	2,60	2694728,9	978890,3	2265023,5	1398215	45	1	0	1	0	0	0