



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ СКОПЈЕ



Васко Никола Гацевски

**УПРАВУВАЊЕ СО РИЗИЦИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИЈА НА
ПРОЕКТИ ЗА ТУНЕЛИ**

Докторски труд

Скопје, 2026



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ СКОПЈЕ



Васко Никола Гацевски

УПРАВУВАЊЕ СО РИЗИЦИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИЈА НА ПРОЕКТИ ЗА ТУНЕЛИ

Докторски труд

Скопје, 2026

Докторанд:

ВАСКО НИКОЛА ГАЦЕВСКИ

Тема:

УПРАВУВАЊЕ СО РИЗИЦИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИЈА НА ПРОЕКТИ ЗА ТУНЕЛИ

Ментор:

Проф. д-р МАРИЈАНА ЛАЗАРЕВСКА

Градежен факултет – Скопје, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Комисија за одбрана:

Проф. д-р ЗЛАТКО ЗАФИРОВСКИ (претседател)

Градежен факултет – Скопје, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Проф. д-р МАРИЈАНА ЛАЗАРЕВСКА,

Градежен факултет – Скопје, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Проф. д-р ВАЛЕНТИНА ЖИЛЕСКА ПАНЧОВСКА,

Градежен факултет – Скопје, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Проф. д-р МИЛОШ КНЕЖЕВИЌ,

Градежен факултет – Подгорица, Универзитет во Црна Гора

Проф. д-р НЕНАД ИВАНИШЕВИЌ,

Градежен факултет – Белград, Универзитет во Белград

Научна област:

ГРАДЕЖНИШТВО

Датум на одбрана:

УПРАВУВАЊЕ СО РИЗИЦИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИЈА НА ПРОЕКТИ ЗА ТУНЕЛИ

Апстракт

Современото инженерство се соочува со растечка потреба од систематско управување со ризици при реализација на инфраструктурни проекти со висока техничка и економска сложеност. Подземните градежни објекти, особено тунелите, се меѓу најризичните типови на конструкции поради несигурностите поврзани со природните услови, ограничената достапност на податоци и динамичната интеракција помеѓу човекот, технологијата и средината. Во такви услови, управувањето со ризикот претставува клучен инструмент за обезбедување на безбедност, доверливост и одржливост на проектите.

Проблемот на ризик во проектите за тунели произлегува од големата варијабилност на геолошките и технолошките параметри, што често резултира со неочекувани промени, дополнителни трошоци и безбедносни предизвици. Постоечките методологии во домашната и регионалната пракса често се базираат на субјективни процени и не овозможуваат интегрирано и динамично ажурирање на податоците и детална разработка на ризиците. Потребата од современ, унифициран и интелигентен пристап за управување со ризици посебно е изразена кај инфраструктурните проекти во Македонија, каде се реализираат тунели со различни карактеристики и услови. Од тие причини ова истражување цели кон развој на модели за управување со ризици при реализација на проектите за тунели, кој ги комбинира класичните инженерски методи со современите техники на вештачката интелигенција и машинско учење.

Во рамките на истражувањето развиена е база на податоци со геометриски, геолошко-геотехнички, конструктивни и технолошки параметри од реални тунелски проекти, која понатаму е користена во моделите. Применети се различни квалитативни и квантитативни методи за пресметка на веројатности на појава, моделирање на сценарија (дрва на грешки и настани), класификација, процена и предвидување на ризици (алгоритми на машинско учење и Бајесови мрежи) и дефинирање на прифатливи граници на ризик и соодветни мерки.

Резултатите укажуваат дека интеграцијата на повеќе методи и техники овозможува подобро разбирање на сложените интеракции меѓу параметрите и значително ја зголемува точноста на процената. Примената на квантитативни индикатори во комбинација со интелигентни алгоритми овозможува процена на ризиците, како и предвидување на нови ризични зони.

Научниот придонес на истражувањето се состои во создавање на нови интегрирани модели за интелигентно управување со ризици во тунелските проекти, кои може да се применат и во други видови на инфраструктурни конструкции. Практичниот придонес претставува можноста за директна примена во инженерската пракса за идентификација, предвидување и контрола на ризици во реално време. Покрај тоа ова истражување може да се искористи како основа за воспоставување на национален систем за управување со ризици, кој ќе придонесе кон зголемена безбедност, оптимизација на ресурсите и одржливост на проектите. Со тоа, трудот не само што придонесува кон научното разбирање на ризиците во подземната градба, туку и создава патоказ за развој на современа, дигитализирана и превентивно ориентирана инженерска пракса во Македонија и пошироко.

Клучни зборови: управување со ризици, тунели, веројатности на појава и лом, анализа на дрво на грешки и настани, квантитативна анализа, машинско учење, Бајесови мрежи.

RISK MANAGEMENT IN THE IMPLEMENTATION OF TUNNEL PROJECTS

Abstract

Modern engineering faces a growing need for systematic risk management in the implementation of infrastructure projects characterized by high technical and economic complexity. Underground structures, especially tunnels, are among the most risk-prone types of constructions due to uncertainties related to natural conditions, limited data availability, and the dynamic interaction between humans, technology, and the environment. Under such conditions, risk management becomes a key instrument for ensuring the safety, reliability, and sustainability of projects.

The problem of risk in tunnel projects arises from the high variability of geological and technological parameters, which often results in unexpected changes, additional costs, and safety challenges. Existing methodologies in domestic and regional practice are mostly based on subjective assessments and do not allow for integrated and dynamic data updating or detailed risk elaboration. The need for a modern, unified, and intelligent approach to risk management is particularly evident in infrastructure projects in Macedonia, where tunnels with diverse characteristics and conditions are being implemented. For these reasons this research aims to develop models for risk management in the implementation of tunnel projects, combining traditional engineering methods with modern techniques of artificial intelligence and machine learning.

A database has been developed within the research, containing geometric, geological-geotechnical, structural, and technological parameters from real tunnel projects, which was subsequently used in the models. Various qualitative and quantitative methods were applied for probability estimation, scenario modeling (fault and event trees), classification, assessment, and prediction of risks (machine learning algorithms and Bayesian networks), as well as for defining acceptable risk thresholds and appropriate mitigation measures.

The results indicate that integrating multiple methods and techniques enables a better understanding of complex parameter interactions and significantly increases the accuracy of risk assessment. The application of quantitative indicators combined with intelligent algorithms allows not only the evaluation of risks but also the prediction of new potential risk zones.

The scientific contribution of the research lies in the creation of new integrated models for intelligent risk management in tunnel projects, which can also be applied to other types of infrastructure structures. The practical contribution is the possibility of direct application in engineering practice for real-time identification, prediction, and control of risks. Moreover, this research can serve as a foundation for establishing a national risk management system, contributing to enhanced safety, resource optimization, and project sustainability. Thus, this work not only contributes to the scientific understanding of risks in underground construction but also provides a roadmap for the development of a modern, digitalized, and prevention-oriented engineering practice in Macedonia and beyond.

Keywords: risk management, tunnels, probability of occurrence and failure, fault and event tree analysis, quantitative analysis, machine learning, Bayesian networks.

Посветено на Марија и Елена.

Јас, Васко Гацевски изјавувам дека докторскиот труд е оригинален труд што го имам изработено самостојно и дека електронската верзија на трудот е идентична со отпечатениот докторски труд.

Васко Гацевски

Листа на табели:

Табела 2.1 Примери за несигурности кај тунелите и влијателни параметри за успешност (Šračková, 2012)	8
Табела 2.2 Категоризација на ризици кај тунелските проекти (повеќе извори)	11
Табела 2.3 Податоци за несреќи за време на изградба на тунели низ светот (повеќе извори)	12
Табела 2.4 Најчести хазарди при изградба на тунелите и мерки за намалување на ризиците (повеќе извори).....	12
Табела 2.5 Тунели проследени со големи ризици во период од 1994 до 2025 година (повеќе извори).....	13
Табела 2.6 Тунелски проекти и начини на управување со ризиците (повеќе извори)	14
Табела 3.1 Пример на идентификувани ризици и нивна главна подлеба (Yazdani-Chamzini, 2014)	22
Табела 3.2 Процена на време и цена по метар за различни RMR интервали кај патни тунели со слични карактеристики (Mahmoodzadeh, et al., 2020)	26
Табела 3.3 Листа на истражувања поврзани со управување со ризици кај проекти за тунели (повеќе извори).....	27
Табела 4.1 Пример од матрица на ризик (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004)	32
Табела 4.2 Однос помеѓу веројатноста на појава и степенот на влијание врз појава на хазард ((Stille, 2017) со одредено надополнување)	39
Табела 4.3 Маркова матрица за веројатности на транзиција на состојби на ризик кај тунели	40
Табела 4.4 Рејтинзи за интензитетот на ефектите во анализата на видот и последиците од лом	42
Табела 4.5 Рејтинзи за веројатност на појава во анализата на видот и последиците од лом	42
Табела 4.6 Рејтинзи за детекција на потенцијалните хазарди во анализата на видот и последиците од лом.....	43
Табела 4.7 Процена на ризиците во однос на бројот на приоритет на ризик (БПР)	43
Табела 4.8 Пример од анализа на видот и ефектите од лом кај тунел во изградба	43

Табела 4.9 Пример од употреба на кластеризација за процена на течење на вода во метро тунел (Zhang, Wang, & Wu, 2021)	47
Табела 4.10 Класификација на ризикот и активности кои треба да бидат превземени (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004).....	55
Табела 4.11 Класификација за веројатност на појава на ризици кај тунелите според ГТА (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004).....	57
Табела 4.12 Класификации на последици кај тунелите (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004)	57
Табела 4.13 Предложена класификација за економски и временски последици кај тунелите	57
Табела 4.14 Пример од мерки за справување со ризици кај тунелски проекти во различни фази (DAUB-Working Group, 2022; Gebremeskel & Gebregziabher, 2021)	59
Табела 4.15 Генерални цели кај различни проектни фази во однос на управување со ризици (DAUB-Working Group, 2022)	62
Табела 5.1 Тунели на делинца I Бељаковце-Крива Паланка	64
Табела 5.2 Тунели на делинца II Крива Паланка-граница со Бугарија	65
Табела 5.3 Тунели на делинца III Кичево-граница со Албанија	66
Табела 5.4 Пример од сегмент поделен на 3 подсегменти	67
Табела 5.5 Пример од коефициент за истражни дупнатини	68
Табела 6.1 Основни статистички вредности за базата на податоци со 341 сегмент	72
Табела 6.2 Парови на податоци со највисоки корелации	74
Табела 6.3 Тежински коефициенти (w_i) според различни методи	75
Табела 6.4 Тежински коефициенти и насоки на параметрите за пресметка на глобална веројатност на појава	78
Табела 6.5 Веројатности на појава на хазарди и ризици добиени преку дрвото на грешки и настани	82
Табела 6.6 Просечно учество на основите групи и највлијателни фактори	82
Табела 6.7 Резултати од матрица на ризик за анализата со дрво на грешки и настани	82
Табела 6.8 Кластеризација на податоците според различни методи	87
Табела 6.9 Вкупен број на кластери и процентуално учество на сегментите.....	88
Табела 6.10 Главни карактеристики на кластерите според методите за кластеризација .	88

Табела 6.11 Процена на точноста трите модели за предвидување според различни кластер методи со претходно модифицирано влијание	90
Табела 6.12 Предложена класификација за веројатност на појава на ризици кај тунелите	93
Табела 6.13 Процена на точноста на трите модели со претходно проценети ризици	97
Табела 6.14 Категории за дискретизација на податоците	97
Табела 6.15 Процена на просечна точноста кај Бајесова мрежа 1 со различни комбинации за валидација	98
Табела 6.16 Првите 10 Јазли со најголемо влијание на врските во Бајесова мрежа 1	99
Табела 6.17 Процена на просечна точноста кај Бајесова мрежа 2 со различни комбинации за валидација	101
Табела 6.18 Првите 10 Јазли со најголемо влијание на врските во Бајесова мрежа 2	101
Табела 6.19 Процена на просечна точноста кај Бајесова мрежа 3 со различни комбинации за валидација	103
Табела 6.20 Првите 10 Јазли со најголемо влијание на врските во Бајесова мрежа 3	103
Табела 6.21 Дискретизација со намален број на категории	105
Табела 6.22 Првите 10 Јазли со најголемо влијание на врските во модифицираната Бајесова мрежа	105
Табела 6.23 Процена на просечна точноста кај сите модели со претходно дефинирани квалитативни категории	107
Табела 7.1 Процентуално учество на сите сегменти во секоја категорија на проценети ризици според развиените модели	110
Табела 7.2 Процентуално учество на сегменти во секоја категорија во однос на сите делници	110
Табела 7.3 Процентуално учество на сегменти за секоја делница посебно	111
Табела 7.4 Пресметани трошоци за ископ и примарна подградба (главни тунелски работи) на анализираниите сегменти	111
Табела 7.5 Пресметани трошоци за главните тунелски работи за сегментите со влијанието на проценетите ризици при различни сценарија	112

Листа на слики:

Слика 2.1 Број на несреќи во градежништвото во Македонија (МЗЗПР, 2010-2024)	7
Слика 3.1 Комбинација на дрво на грешки и дрво на настани (позната и како Bow-tie risk analysis-анализа на ризици машна) (Sharafat, Latif, & Seo, 2021)	17
Слика 3.2 Дистрибуција на хазарди при изградба на 132 тунели низ светот (Sousa, 2010)	18
Слика 3.3 Дијаграм на влијание за тунелот во Порто Метро (Sousa, 2010).....	19
Слика 3.4 Пример од јазлите на динамичка Бајесова мрежа за процесот на изградба на тунел (Špračková, 2012).....	19
Слика 3.5 Развиен Копула-Бајесов модел за процена на состојбата на тунели во експлоатација (Yue, et al., 2019).....	20
Слика 3.6 Пример од еквивалентен модел на континуирана временска Бајесова мрежа за течење на вода во тунел (Guo, Zheng, Zhang, & Yang, 2022).....	21
Слика 3.7 Структура на ризични фактори за колапс во тунел (Wu, et al., 2022)	21
Слика 3.8 Фази Бајесов пресметковен модел (Wang, et al., 2023).....	22
Слика 3.9 Рангирање на проценети ризици според фази аналитички хиерархиски процес (Haghshenas, Haghshenas, Abduelrhman, Zare, & Mikaeil, 2022).....	23
Слика 3.10 Моделот на структурни равенки за процена на ризик кај метро тунел изграден со минирање (Wang, Xiong, Zhu, & Guo, 2023)	24
Слика 3.11 Дијаграм за предложен хибриден пристап за одлука со повеќе класификатори (Pan, Zhang, Wu, & Skibniewski, 2020).....	25
Слика 4.1 Шема на процесот на управување со ризици (ISO3100, 2018).....	30
Слика 4.2 Пример од регистар на ризици за премин на тунел под мост во Софија (Semerano, Chiriotti, Mercier, & Della Valle, 2012)	31
Слика 4.3 Симболи кои најчесто се користат за настани во дрвото на грешки	34
Слика 4.4 Симболи кои најчесто се користат за порти во дрвото на грешки	35
Слика 4.5 Пример од анализа на дрво на грешки за подводен тунел (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004)	36
Слика 4.6 Пример од дрво на настани при појава на нестабилност на челото на ископот кај железнички тунел.....	37
Слика 4.7 Пример од анализа на дрво на одлуки за избор на тип на железнички тунел (ЕТЦ – една тунелска цевка; ДТЦ – две тунелски цевки) (Vanorio & Mera, 2012)	38

Слика 4.8 Принцип на комбинација на дрво на грешки и дрво на настани (анализа машина)	39
Слика 4.9 Пример од Марков дијаграм за промена на состојби на ризик кај тунелски проекти	40
Слика 4.10 Пример за предвидување на состојба на ризик кај тунелски проекти на долг период (стабилна состојба) според Марков процес	41
Слика 4.11 Структурен дијаграм на алгоритмот на случајни дрва (Yang, et al., 2025)	48
Слика 4.12 Основна структура на XGBoost моделот на дрва (Zhao, Wang, Li, Guo, & Lin, 2023)	48
Слика 4.13 Шематски дијаграм на хиперрамнина (Sun, Feng, & Yang, 2018)	49
Слика 4.14 Пример од основна невронска мрежа (Zhou H. , 2023)	50
Слика 4.15 Процес на процена на ризици во тунели со примена на модифицирана CNN (Yang & Chen, 2025)	50
Слика 4.16 Пример од едноставна Бајесова мрежа за ризик кај тунели	51
Слика 4.17 Пример од едноставна Бајесова мрежа за ризик кај тунели со доделени веројатности	52
Слика 4.18 Пример од едноставна Бајесова мрежа за ризик кај тунели со доказ за 100% висок ризик	52
Слика 4.19 Пример од развивање на динамичка Бајесова мрежа со условна зависност помеѓу јазлите (Weber & Simon, 2016)	53
Слика 4.20 Општи критериуми на принципот ALARP (HSE, 2001)	54
Слика 4.21 Споредба помеѓу различни критериуми за прифатливо ниво на ризик (Ноек, 2006)	55
Слика 4.22 Предложен дијаграм за прифатливо ниво на ризик кај тунели во однос на број на очекувани жртви	56
Слика 4.23 Компоненти на мониторинг на ризици (Ettouney & Alampalli, 2017)	60
Слика 5.1 Приказ на неизградените железнички делници на Коридор 8 (Google Earth и Основни проекти за предметните делници)	63
Слика 6.1 Дијаграм со концепт за разработка на моделите	71
Слика 6.2 Хистограми на распределба на податоците	73
Слика 6.3 Корелациска матрица со сите влезни податоци	74

Слика 6.4 Веројатности на појава при гранична вредност дефинирана како медијана.....	77
Слика 6.5 Веројатности на појава при критични гранични вредности.....	77
Слика 6.6 Однос помеѓу глобалната граница на прифатливост и веројатноста на појава	79
Слика 6.7 Корелација помеѓу влезните податоци и композитниот индекс P.....	79
Слика 6.8 Корелациска матрица со редуциран број на влезни податоци	80
Слика 6.9 Дијаграм со концептот за разработка на анализата на дрва	83
Слика 6.10 Дрво на грешки за колапс кај тунел 6 од делница III	84
Слика 6.11 Дрво на настани за колапс кај тунел 6 од делница III.....	85
Слика 6.12 График од пробабилистичката анализа кај дрвото на грешки за колапс кај тунел 6 од делница III	86
Слика 6.13 Просечно влијание на влезните податоци од трите методи според модел 1 без претходна модификација на влијателноста	90
Слика 6.14 Просечно влијание на влезните податоци од трите методи според модел 1 со претходна модификација на влијателноста	91
Слика 6.15 Кластеризација со фиксен број на кластери, односно три ризични категории	91
Слика 6.16 Влијателност на факторите според модел 1 без претходно проценети ризици	92
Слика 6.17 Влијателност на факторите според модел 2 без претходно проценети ризици	92
Слика 6.18 Влијателност на факторите според модел 3 без претходно проценети ризици	93
Слика 6.19 Дистрибуција на проценета веројатноста на ризик за сите сегменти.....	94
Слика 6.20 Дијаграм со застапеност на сегментите во секоја категорија на проценета веројатност.....	94
Слика 6.21 Влијателност на факторите според модел 1 со претходно проценети ризици	95
Слика 6.22 Влијателност на факторите според модел 2 со претходно проценети ризици	95
Слика 6.23 Важност на факторите според модел 3 со претходно проценети ризици	96
Слика 6.24 Бајесова мрежа 1 (GTT алгоритам) со распределба на податоците без докази	99
Слика 6.25 Бајесова мрежа 1 (GTT алгоритам) со распределба на податоците со доказ за 100% висок ризик.....	100

Слика 6.26 Бајесова мрежа 2 (PC алгоритам) со распределба на податоците без докази .	101
Слика 6.27 Бајесова мрежа 2 (PC алгоритам) со распределба на податоците со доказ за 100% висок ризик	102
Слика 6.28 Бајесова мрежа 3 (ANB алгоритам) со распределба на податоците без докази	103
Слика 6.29 Бајесова мрежа 3 (ANB алгоритам) со распределба на податоците со доказ за 100% висок ризик	104
Слика 6.30 Модифицирана Бајесова мрежа (GTT алгоритам) со распределба на податоците без докази.....	106
Слика 6.31 Модифицирана Бајесова мрежа (GTT алгоритам) со распределба на податоците со доказ за 100% ризик	107
Слика 7.1 Анализа за релативно влијание на главните групи на фактори во однос на ризикот.....	109

СОДРЖИНА:

1.	ВОВЕД	1
1.1	Поставеност на проблемот и мотивација	1
1.2	Истражувачки прашања и хипотези	1
1.3	Цели и задачи на истражувањето	2
1.4	Методолошки пристап.....	3
1.5	Теоретски и практичен контекст	4
1.6	Очекуван научен придонес.....	4
1.7	Структура на трудот	5
2.	КОНЦЕПТ НА РИЗИК И НЕГОВО УПРАВУВАЊЕ	6
2.1	Општи поими.....	6
2.2	Несигурности кај тунелите	8
2.3	Категоризација и развој на ризици кај тунелските проекти.....	10
3.	ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА И ИСТРАЖУВАЊА ЗА РИЗИЦИТЕ КАЈ ТУНЕЛИТЕ	17
4.	МЕТОДИ И ПРИСТАПИ ЗА УПРАВУВАЊЕ СО РИЗИЦИ	30
4.1	Квалитативен пристап за процена на ризици	31
4.2	Квантитативен пристап за процена на ризици.....	33
4.2.1	Анализа на дрво на грешки (Fault tree analysis).....	34
4.2.2	Анализа на дрво на настани (Event tree analysis).....	37
4.2.3	Анализа на дрво на одлуки (Decision tree analysis).....	38
4.2.4	Анализа машна-пеперутка (Bow tie analysis).....	38
4.2.5	Маркова анализа (Markov analysis)	40
4.2.6	Анализа на видот и ефектите од лом (Failure mode and effects analysis).....	41
4.2.7	Статистички методи	44
4.2.8	Фази множества и фази логика	44
4.2.9	Други пристапи.....	45

4.3	Пристапи за процена на ризици со примена на машинско учење	46
4.3.1	Кластеризација	46
4.3.2	Алгоритми за учење и предвидување на податоци	47
4.3.3	Вештачки невронски мрежи (Artificial Neural Networks).....	50
4.3.4	Бајесови мрежи (Bayesian networks).....	51
4.4	Евалуација на проценети ризици.....	54
4.5	Третман на ризици.....	58
4.6	Мониторинг и контрола на ризици.....	60
5.	ЖЕЛЕЗНИЧКИ ТУНЕЛИ НА КОРИДОР 8 И РЕЛЕВАНТНИ ПРОЕКТНИ ПОДАТОЦИ	63
5.1	Карактеристики за делниците и тунелите	63
5.1.1	Делница Бељаковце – Крива Паланка	64
5.1.2	Делница Крива Паланка – граница со Бугарија.....	64
5.1.3	Делница Кичево – граница со Албанија	66
5.2	Податоци за тунелите од трите делници	66
5.2.1	Геометриски податоци.....	67
5.2.2	Геолошко-геотехнички податоци	68
5.2.3	Податоци за подградба	69
5.2.4	Податоци за технологија на изградба	70
5.3	База на податоци за анализа на ризици	70
6.	РАЗВИВАЊЕ НА МОДЕЛИ ЗА УПРАВУВАЊЕ СО РИЗИЦИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИЈА НА ПРОЕКТИ ЗА ТУНЕЛИ	71
6.1	Прелиминарна анализа	71
6.1.1	Основни статистички и корелациони анализи.....	72
6.1.2	Анализа со дрво на грешки и настани.....	81
6.2	Модел без претходно проценети ризици	87
6.3	Модел со претходно проценети ризици.....	93
6.3.1	Модел со претходно дефинирани квантитативни вредности.....	93

6.3.2	Модели со претходно дефинирани квалитативни категории	97
7.	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	108
7.1	Анализа на резултатите	108
7.2	Дискусија	112
8.	ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ.....	115
8.1	Примена на моделите при управување со ризици кај нови проекти за тунели..	115
8.2	Ограничувања.....	116
8.3	Заклучоци	117
8.4	Препораки	120
9.	РЕФЕРЕНЦИ	122
10.	ПРИЛОЗИ.....	133
10.1	База на податоци со сегменти проектирани според НАТМ и главните компоненти (влезни податоци) за анализа	134
10.2	Дрва на грешки и дрва на настани за различни хазарди и ризици	178
10.3	Карактеристики на моделите во однос на алгоритмите за машинско учење и Бајесовите мрежи.....	194
10.4	Криви на оперативна карактеристика на приемникот и сигурност/калибрација за висок ризик кај Бајесовите мрежи (ROC-Receiver Operating Characteristic curve & Reliability/Calibration curve)	197

1. ВОВЕД

Современото инженерство сè повеќе се соочува со комплексни предизвици поврзани со планирањето, проектирањето и изградбата на подземни конструкции. Тунелите, како суштински дел од транспортните и енергетските системи, се карактеризираат со високо ниво на техничка, геолошка и организациона сложеност. Секој тунел претставува уникатен систем чија безбедност, стабилност и функционалност зависат од голем број меѓусебно поврзани фактори, од природните услови до применетата технологија. Проектите за тунели се проследени со голем број несигурности и потенцијал за непосакувани настани и последици, што всушност го преставуваат ризикот во својата најопшта форма (Ettouney & Alampalli, 2017). Во таков контекст, управувањето со ризици не е дополнителна активност, туку основен предуслов за успешно реализирање на проектите и за заштита на човечки животи, капитал и околина.

1.1 Постапеност на проблемот и мотивација

Ризиците при изградба на тунели се резултат на сложена комбинација од природни, технолошки и човечки фактори. Сите тие не можат целосно да се опфатат со истражувања пред почетокот на градбата, што води до појава на неочекувани состојби при реализација на проектите. Ризикот е неминовен дел од секој тунелски проект и најголемите последици се јавуваат кога недостасува системски пристап за управување со несигурностите (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004).

Во македонската и регионалната практика, управувањето со ризици сè уште претежно се базира на експертска процена и искуствено знаење. Недостасува примена на квантитативни методи, унифицирани стандарди и бази на податоци кои би овозможиле објективна процена. Ова води кон недоволна ефикасност во донесувањето на инженерски одлуки, зголемени трошоци и безбедносни ризици. Како што нагласуваат (Fang, Zhang, Zhu, & Chen, 2022), современите инфраструктурни системи бараат интегрирани модели за ризик кои овозможуваат предвидување и динамично ажурирање на податоците. Токму оваа потреба претставува мотивација за развивање на нов пристап – модел кој комбинира класични инженерски, стохастички и интелигентни методи за анализа на ризици кај проектите за тунели.

1.2 Истражувачки прашања и хипотези

Главните истражувачки прашања и хипотези ја претставуваат основата за дефинирање на нов начин за управување со ризици при реализација на проектите за тунели:

- Дали постои можност да се користат стандардните проектни податоци за воспоставување на релевантна база на податоци која ќе се користи во процесот на управување со ризици?
- Во која мера класичните методи за анализа можат објективно да ги отсликаат ризиците во различни услови?

- Дали интегрираните модели базирани на машинско учење ја подобруваат точноста за процена на ризиците и даваат порелни и посложени зависности помеѓу параметрите во однос на класичните методи?
- Која група на фактори има најголемо влијание врз глобалниот индекс на ризик?
- Може ли развиените модели да обезбедат практична поддршка при донесување одлуки во реално време и да придонесат кон намалување на ризиците?
- Доколку дефинираниот пристап е многу комплексен, дали тоа само по себе претставува голем ризик за неговата примена?

Врз основа на поставените истражувачки прашања, дефинирани се следните истражувачки хипотези, кои ќе бидат тестирани преку развивање и примена на предложените модели и анализа на резултатите:

- Можно е да се применат веќе постоечки податоци од проектната документација при процена и анализа на ризици;
- Ризиците може да се проценат и без нивно претходно дефинирање, односно само со користење проектни влезни податоци;
- Интегриран модел кој ги комбинира класичните квантитативни методи, алгоритмите за машинско учење и Бајесовите мрежи овозможува пообјективна, поточна и динамична процена на ризиците при реализација на проекти за тунели во споредба со традиционалните пристапи;
- Со квантитативна процена и евалуација може да се добијат конкретни резултати за големината на последиците и да се предложат соодветни мерки;
- Управувањето со ризици со интегрирани модели може да служи за подобрување на идни проекти од аспект на трошоци, време на реализација и безбедност.

1.3 Цели и задачи на истражувањето

Главната цел на истражувањето е развој на интегриран и интелигентен систем за процена и управување со ризици при реализација на проектите за тунели. Моделот треба да овозможи квалитативна и квантитативна процена на веројатностите на појава и предвидување на ризични сценарија врз основа на анализата на реални податоци. Во фокусот на ова истражување се актуелни проекти за тунели во нашата држава.

Делот од Европскиот транспортен Коридор 8 кој се наоѓа во Република Северна Македонија дефиниран е со повеќе проекти од патната и железничката инфраструктура. Во однос на тунелите, доминантна е железницата каде што има најголем број на истите. Поточно делниците Бељковце-Крива Паланка, Крива Паланка-граница со Бугарија и Кичево-граница со Албанија содржат проекти за 49 железнички тунели. За сите три делници има изработено целосна проектна документација на ниво на основни проекти во кои се опфатени и тунелите. Делницата Бељковце-Крива Паланка е во фаза на изградба, додека останатите две се уште не се започнати. Големiot број на тунели со нивните

карактеристики претставува солидна база на податоци која може да се примени во делот на ризиците.

Во рамките на оваа цел, дефинирани се неколку истражувачки задачи:

- Идентификација на клучните фактори на ризик поврзани со геометриските, геолошките, технолошките и конструктивните услови;
- Развој на сеопфатна база на податоци за тунелски параметри и ризични случаи;
- Примена на квантитативни индикатори и корелации одредување на веројатноста на појава и најзначајни фактори за примена во моделите;
- Моделирање на сценарија преку дрво на грешки и дрво на настани;
- Интеграција на алгоритми од машинско учење за автоматска класификација и предвидување на ризици;
- Воспоставување на Бајесови мрежи за динамична процена на условни веројатности;
- Формулирање на систем за прифатливост на ризици базиран на ALARP концептот, F-N дијаграмите и матриците на ризик;
- Дефинирање на мерки за различни категории на ризици;
- Развивање на практични препораки и насоки за примена во инженерската пракса и националните стандарди.

1.4 Методолошки пристап

Методолошкиот пристап се базира на комбинирање на квантитативни, стохастички и „интелигентни“ техники. Прва е анализата на достапните податоци од тунелски проекти со идентификација и рангирање на параметрите со најголемо влијание врз ризикот. Потоа следува применета анализа на веројатности (Stille, 2017) и тежински коефициенти со цел да се добие мерлива процена на сигурноста.

Со дефинирана база на податоци, веројатности и тежински коефициенти се развиваат модели за управување на ризиците, со две различни претпоставки околу познавањето на ризикот. Поточно модели без и со претходно дефинирани ризици. Тука доаѓа до примена на машинското учење, односно кластеризација на тунелски сегменти и дефинирање на различни нивоа на ризик и примена на различни алгоритми кои може да учат и предвидуваат податоци и да препознаат шаблони, како и модели со Бајесови мрежи преку кои експлицитно може да се моделираат неизвесноста и зависностите меѓу променливите.

Бајесовите мрежи се користат како логички модел кој овозможува интеграција на експертско знаење со емпириски податоци во форма на дискретизирани категории (Sousa, 2010; Špačková, 2012). Овој пристап овозможува ажурирање на веројатностите во реално

време при промена на условите на теренот или при тестирање на докази и различни состојби.

Во завршната фаза од управувањето се извршува анализа на прифатливоста на ризиците од различни аспекти (економски, временски, човечки и еколошки) и се предложуваат мерки за справување (ISO3100, 2018).

1.5 Теоретски и практичен контекст

Управувањето со ризиците во тунелоградбата не треба да биде изолиран процес, туку дел од целокупниот инженерски систем (Sousa, 2010). Во таа насока, истражувањето се потпира на современите принципи на управување со ризици (DAUB-Working Group, 2022; Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004; ISO3100, 2018) и прави интеграција со современи методи на вештачка интелигенција и машинско учење.

Трудот обезбедува нов начин за квантификација и визуелизација на ризиците преку комбинирање на различни методи и анализи. Ваквиот пристап овозможува појасна идентификација на критичните комбинации на параметри што доведуваат до несакани настани, како и оптимизација на мерките за намалување на ризиците. Дополнително, истражувањето има особено значење за локалниот контекст, бидејќи овозможува воспоставување на унифицирана методологија која може да се примени во идните инфраструктурни проекти на Коридор 8 и слични проекти во регионот.

1.6 Очекуван научен придонес

Ова истражување воспоставува нова методолошка рамка за анализа и управување со ризици во тунелоградбата. Преку интегрирање на машинското учење и Бајесовите мрежи се развива интелигентен систем кој не само што ја пресметува веројатноста на ризиците, туку и се адаптира на нови податоци и учи од претходни искуства. Така, истражувањето преминува од класичен концепт на статичка процена кон динамичен, прогнозен и самообновлив систем на инженерска анализа.

Примената на овој модел претставува иновативен чекор во домашниот научен и технички контекст, каде што досега најчесто доминираат детерминистички и субјективни пристапи. Со развојот на интегриран систем заснован на статистика, логика и податочна интелигенција, се поставува основа за воспоставување на национална инженерска парадигма во која одлуките се носат врз основа на податоци и докази.

Во поширок општествен контекст, трудот овозможува развивање на концепт на превенција и транспарентност во инфраструктурното планирање. Создавањето на база на податоци и систем за управување со ризиците ќе овозможи подобра соработка меѓу јавните институции, проектантите и изведувачите, со што се зајакнува јавната безбедност, довербата и долгорочната одржливост на инфраструктурните инвестиции.

Покрај тоа овој труд не само што обезбедува методолошка рамка за анализирање на ризици, туку ја поттикнува инженерската култура на планирање и донесување одлуки базирани на податоци. Со тоа, се поставува нова научна и професионална насока во управувањето со ризици кај проекти за тунели во Македонија и пошироко.

1.7 Структура на трудот

Трудот е структуриран во неколку логички поврзани поглавја.

Во Поголавје 1 е даден воведот со поставеноста на проблемот, целите и методологијата на истражувањето.

Поголавје 2 ја разгледува теоретската и методолошка основа за управување со ризици и дава осврт на категоризацијата и развојот на ризиците кај тунелите со приказ на техничките одлики на најкарактеристичните тунелски проекти во светот во последните 30 години.

Поголавје 3 дава преглед на релеватната литература и истражувања за ризиците кај тунелите, како и табеларен приказ на релеватни трудови во последните години.

Поголавје 4 ги опишува методите и пристапите за управување со ризиците преку класичните квалитативни и квантитативни техники до најновите модели базирани на машинско учење. Исто така во ова поглавје се предложени и критериуми за прифатливост и класификација на проценетите ризици од аспект на човечки, економски и временски последици.

Поголавје 5 се однесува на релевантите делници и тунели и нивните карактеристики кои се користат за формирање на базата на податоци.

Поголавје 6 го презентира развојот и примената на моделите за управување со ризици кај проектите за тунели на Коридор 8. Дадена е прелиминарна анализа за разработка и првична процена на ризиците и дефинирање на одредени сценарија и зависности. Потоа следуваат главните модели кои се првично без претходно дефинирани ризици, односно примена на кластеризација, а потоа со претходно дефинирани ризици и нивна разработка (учење, предвидување и валидација) со модели со машинско учење и Бајесови мрежи.

Во поглавје 7 прикажани се добиените резултати од истражувањето и се два нивна дискусија.

Кај поглавјето 8 се синтетизираат научните и применливите сознанија од изработката на трудот.

Во поглавје 9 прикажани се сите користени референци во трудот.

Поголавјето 10 содржи прилози.

2. КОНЦЕПТ НА РИЗИК И НЕГОВО УПРАВУВАЊЕ

2.1 Општи поими

Ризикот е поврзан со одредени настани кои предизвикуваат последици кои се најчесто негативни. Во литературата постојат огромен број на дефиниции за ризик, но главните поими кои се користат во оваа област се следните (IPCC, 2012):

- хазард – ситуација, состојба или настан кој има потенцијал за несакани последици (се среќава и како непосакуван настан или инцидент);
- повредливост (чувствителност) – потенцијал за претрпување на штета, загуба или повреди;
- последици врз т.н. елементи изложени на ризик – човечки повреди или жртви, штета врз имот, штета врз животната средина, финансиска или временска загуба (доцнење на комплетирањето на проектот или прекин на работа);
- ризик – веројатност за појава на некоја несигурност или хазард, која ќе има несакани последици, односно комбинација на веројатностите за појава на хазард и последици по елементите изложени на ризик;

Овие термини се доста блиски меѓу себе, па често се испреплетуваат и секогаш се меѓусебно поврзани.

Постојат разни манифестации и поделби на ризикот, кои најчесто се поврзани со видот на хазардите и последиците (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004; Ettouney & Alampalli, 2017):

- природен ризик – каде хазардите се со природно потекло (колапс, свлечишта, одрони, поплави, лавини, земјотреси и сл.);
- ризик од човечки интервенции – каде хазардите се со вештачко потекло (градежни и рударски активности, депонии, експлозии, истекување на радиоактивни и други материјали кои се штетни по човекот и околината и сл.);
- иницијален (ефективен) ризик – првичен ризик пред одредување и имплементирање на било какви дополнителни мерки;
- резидуален ризик – ризик по одредување и имплементација на соодветни мерки за превенција, пренесување или намалување на иницијалниот ризик;
- оперативен ризик – поврзан со процесот на донесување одлуки, како и нивниот резултат;
- стратешки ризик – поврзан со стратешки одлуки во државата (национална стратегија за безбедност, национална транспортна стратегија и сл.);
- финансиски ризик – проследен со монетарна загуба;

- технолошки ризик – внесување, употреба или откажување на нови технологии, техники, материјали или дигитални алатки;
- еколошки ризик – проследен со загадување на околната средина;
- политички ризик и др.

Концептот на хазарди и ризици е важна алатка во многу технички области, чии почетоци се поврзуваат со воената, нуклеарната и нафтената индустрија. Во денешно време, ваквиот пристап е широко распространет и се повеќе прифатен кај тунелите и останатите подземни конструкции. Управувањето на ризиците овозможува подобро разбирање на сите процеси кои се поврзани со несигурности и претпоставки (Bergmeister, 2022; Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004; Ettouney & Alampalli, 2017).

Градежништвото е една од најризичните дејности во општеството проследена со човечки последици. Во нашата држава просекот на смртни случаи во периодот од 2010 до 2024 изнесува 7 жртви годишно (Слика 2.1), односно стапката на фатални повреди изнесува околу 15 жртви на 100.000 градежни работници. За истиот период, просекот на стапката на повреди изнесува 20 годишно. Во овој период од 14 години, градежништвото 4 години е на прво место во однос на другите дејности, поточно прво место за вкупен број на смртни случаи (МЗЗПР, 2010-2024). Според Eurostat (статистичка канцеларија на Европска Унија) во 2023 година, најголем дел од несреќите со повреди во Европската Унија се во градежништвото (Eurostat, 2025). При реализација на тунелските проекти, според различни истражувања во светот, просекот на смртни случаи изнесува околу 10 до 20 жртви годишно, што покажува на сериозноста на овие градежни конструкции (Kikkawa, Itoh, Hori, Toyosawa, & Orense, 2015; Yang, Wang, Easa, & Yan, 2022).



Слика 2.1 Број на несреќи во градежништвото во Македонија (МЗЗПР, 2010-2024)

Модерниот процес на управување со ризици кој е применлив во сите дејности, вклучува неколку клучни чекори (ISO3100, 2018):

- Контекст – поставување рамка и цели на анализата;
- Идентификација на ризици – систематско препознавање на можни закани;
- Анализа на ризици – процена на веројатност и последици, со квалитативни или квантитативни методи;
- Евалуација и приоритизација – споредување со прифатливи нивоа на ризик;
- Третман на ризици – избор на стратегии за елиминација, редукција, трансфер или прифаќање на ризик;
- Мониторинг и ревизија – следење и ажурирање на ризичниот профил низ животниот циклус на проектот.

2.2 Несигурности кај тунелите

Тунелите се проследени со голем број на несигурности, кои всушност го креираат ризикот. За полесно справување со несигурностите, истите треба да се проучат во рамки на посебен дел од секој проект. Нивното препознавање и анализа претставуваат основа за ефективно управување со ризиците и оптимизација на проектните решенија (Song, Su, Tian, Zhang, & Zhou, 2021).

Несигурностите кај тунелите претставуваат комплексна комбинација на геолошки, технолошки и човечки фактори, кои може да се појават во сите проектни фази (Zhang, Yu, Wang, & Xu, 2023). Тие може да се поделат на вообичаени (стандардни) и вонредни (нестандардни-исклучителни) несигурности кои влијаат врз целите на засегнатите страни во рамки на проектот, а може да се изразат преку параметри за успешност (Табела 2.1).

Табела 2.1 Примери за несигурности кај тунелите и влијателни параметри за успешност (Špačková, 2012)

Фаза на планирање и проектирање	Фаза на изградба	Фаза на експлоатација
Вообичаени несигурности: Квалитет на проектантскиот тим; Геотехнички истражувања; Тендерирање.	Вообичаени несигурности: Геолошки услови; Технологија на градење; Организација; Цени на материјали и работници.	Вообичаени несигурности: Квалитет на одржување; Трајност на материјали; Број на возила.
Вонредни несигурности: Одбивање за финансирање; Законски пречки; Јавно противење.	Вонредни несигурности: Колапс, поплава и сл.; Непредвидени структури; Прекумерни деформации.	Вонредни несигурности: Пожар; Сообраќајни несреќи; Колапс, поплава и сл.
Параметри за успешност: Цена и време за проектирање; Трошоци и време за експропријација; Време за добивање дозволи и согласности.	Параметри за успешност: Трошоци и време за изградба; Квалитет; Финансирање.	Параметри за успешност: Приходи/достапност; Трошоци за одржување и работа; Влијание врз животната средина; Животен век на тунелот.

Во нашата држава самиот поим за подземна конструкција претставува генерален проблем, односно еден вид на несигурност при избор на проектни решенија, што најчесто е придружен со недоволни финансиски средства за детално да се истражи неговата оправданост. Во голем број случаи ова резултира со прифаќање на „поевтени“ решенија, односно проектни варијанти во кои нема тунели или галерии. Според досегашните искуства при изградба на големи инфраструктурни проекти, ваквиот пристап доведува до несигурности во фазата на градење и експлоатација и големи надминувања на трошоците и времето, односно голема генерација на ризици. Затоа потребно е детално разбирање на сите несигурности во рамки на проектот, а тоа најчесто се прави со неколку активности:

а) Претходни податоци

Обемот, како и квалитетот на податоците, се влијателен фактор при проектирање и изградба на тунелите. Претходните (постоечки) податоци како претходни проектни фази и студии имаат голема улога во детерминирање на несигурностите. Генерално кај тунелите процесот на проектирање се одвива во три фази, односно физибилити студија (во градежната пракса често именувана како претпроект), идеен проект и основен проект. Непостоењето или недостапноста на одредени податоци или цели фази директно имплицира големи несигурност (Karunaratne & Kim, 2025).

б) Истражувања на локацијата за изградба

Типичните компоненти на ваквите истражувања кај тунелите се:

- Собирање на постоечки информации – регионални карти (топографски, геолошки, морфолошки, хидролошки, сеизмички и сл.), сателитски снимки, техничка литература, студии и извештаи;
- Теренски истражувања – директни истражувања (дупнатини и бунари), индиректни истражувања (геофизички), геодетско снимање и мониторинг;
- Лабораториски испитувања (тестови) – идентификација и класификација на материјалите и одредување на нивните геотехнички, хидраулички и други параметри;
- Теренско рекогносцирање и картирање – геолошко, геоморфолошко и хидрогеолошко;
- Истражни/пилот тунели или окна – идентификација на комплексни геолошки средини, пробни полиња за инјектирање, поставување на подградба и сл.

Неидентификуваните карактеристики на теренот може да доведат до неочекувани услови при реализација на проектите. Овие несигурности за подземни проекти се поврзани со ограничувањето на можноста, однапред да се предвидат идни геолошки настани, промени во инженерските компоненти со тек на времето, промени во околината предизвикани од климата и промени кои се јавуваат при самиот ископ (пробивање) (Chang, Nordin, Gu, & Zhao, 2025). Обемот и квалитетот на истражувањата имаат многу големо влијание врз појавата на геолошки (геотехнички) несигурности. Кај тунелите, примарниот извор на несигурности вообичаено е несоодветниот пристап во овој сегмент (Sun, Wu, & Wu, 2025; Xia, Xiong, Dong, & Lu, 2017). При анализа на неколку долги и длабоки тунели во

Европа, проценето е дека истражувањата претставуваат од 1,5 до 9% од вкупното чинење на тунелите (ITA, 2015).

в) Технологија на изградба

Начинот на изградба на тунелите во одредени сегменти може да предизвика несигурности. Поточно несигурностите може да се појават при несоодветен начин на ископ (минирање) и управување со материјалот, користење на несоодветна механизација, неправилно поставување на подградбата (временски отстапувања), неквалификувана работна сила, непочитување на мерките за безбедност, несоодветни работни услови и организација на градилиштето и др. Посебни проблеми и несигурности се јавуваат при неконвенционалните методи за изградба (Koohathongsumrit & Meethom, 2024; Kwon, Kang, Shin, Ahn, & Choi, 2025):

- Tunnel Boring Machines (ТБМ машини) кои се големи кртици што прават ископ на материјалиот со ротација на предниот дел, додека во задниот дел се поставува подградбата и се транспортира ископаниот материјал (Bilgin & Acun, 2024);
- „Cut&Cover“ метода, односно пристап каде што прво се прави класичен ископ од површината до оската на тунелската цевка за потоа тој да се изгради во отворен простор и на крај да се покрие повторно со материјал. Оваа метода најчесто се применува за тунели со мал надслој (10 до 20m) (Ponnuswamy & Victor, 2016);
- Методи за градење на потопени и подводни тунели кои се градат на одредено ниво (блиску или на самото дно) во водени средини, со специјални елементи за такви услови (Zhang, Kong, Chen, & Zhang, 2024).

г) Мониторинг и контрола

Со мониторингот и контролата на конструкциите и околната средина можат да се добијат вредни информации и податоци во фаза на проектирање, изградба и експлоатација. Со правилен пристап, одредени појави соодветно би се третираше, но од друга страна доколку не се добиваат и интерпретираат правилно податоците, може да се појават и непредвидени несигурности кои доведуваат до поголеми проблеми. Оштетувањето на мерните инструменти и уреди кое може да се јави во било која проектна фаза, често е индикатор за можна појава на несигурности. Мониторингот и контролата претставуваат мерка за рано детектирање на ризиците (Sun, Zhu, Dai, Liu, & Li, 2024; Xia, Xiong, Dong, & Lu, 2017).

2.3 Категоризација и развој на ризици кај тунелските проекти

За потребите од систематски пристап кон управување со ризици, потребна е нивна категоризација. Одредени меѓународни организации што се занимаваат со оваа проблематика препорачуваат унифицирана структура на категории која овозможува интегрирање на ризиците во сите фази на проектот – од идејно решение до експлоатација. Во (Табела 2.2) дадени се категории на ризици со нивните главни несигурности кои се општо прифатени според светската пракса кај тунелските проекти.

Табела 2.2 Категоризација на ризици кај тунелските проекти (повеќе извори)

Ризици	Несигурности
Проектантски и геометриски	Погрешна процена на должина и надслој Неоптимален облик и димензија на профилот Неусогласеност помеѓу проектните и теренските податоци
Геолошки и геотехнички	Неочекувани геолошки формации, раседи и отвори (шуплини) Променливи вредности во геотехничките класификации Подземна вода и притисоци Појава на гасови Сеизмички влијанија
Технолошки и конструктивни	Неправилен избор на технологија на изградба Неправилно минирање Недоволна механизација Несоодветно поставување на подградба
Организациски и менаџерски	Недоволна координација помеѓу учесници Недостиг на обучен персонал Недефинирани одговорности Проблеми со подизведувачи
Економски и финансиски	Промена на цени Одложени плаќања Недоволно финансирање
Еколошки и социјални	Загадување (вода, почва, воздух) Вибрации и бучава Социјален отпор
Безбедносни	Несоодветна вентилација и осветлување Недостиг на заштитна опрема Експлозии и пожари
Правни и договорни	Судски спорови Неусогласеност со стандарди Нејасни договорни клаузули

Овие категории овозможуваат интегрирано да се пристапи кон управувањето со ризици за понатаму детално да се разработат hazardите, последиците, границите на прифатливост и мерките.

Управувањето со ризиците кај тунелите во минатото било индиректно, преку класичните инженерски практики и не се анализираше детално и посебно. Историски гледано, реализацијата на тунелските проекти долго била проследена со значителен број жртви, а значително намалување доаѓа со појавата и примената на Новата Австриска Тунелска Метода (НАТМ) во 50-тите години од минатиот век, како и напредокот на останатите тунелски методи, технологии и механизација (Табела 2.3). Првичните предности биле манифестирани преку помали трошоци, висок прогрес и зголемена безбедност. НАТМ се базира на основните принципи на постарите методи, каде се врши ископ и се поставува примарна подградба на целиот попречен пресек во повеќе фази, а потоа се изработува финална облога. Главната карактеристика е самата карпеста маса која претставува примарен носечки елемент и нејзината јакост треба да биде зачувана, а деформациите сведени на минимум (Austria Patent No. 165573, 1948). Денес, оваа метода е една од најприменуваните во светот, со изградени голем број различни тунели и подземни отвори. Сепак, за нејзината примена потребни се подетални геотехнички податоци и анализа за да се предвидат и класифицираат теренските услови и елементите на подградбата (Maidl, Thewes, & Maidl, 2013; Ponnuswamy & Victor, 2016).

Табела 2.3 Податоци за несреќи за време на изградба на тунели низ свеќош (повеќе извори)

Име	Локација	Период	Вкупна должина [km]	Број на жртви	Причина
Хауенштајн	Швајцарија	1853-1858	2,5	63	Пожар
Готард	Швајцарија	1872-1882	15	199	Експлозии, колапси
Арлберг	Австрија	1880-1884	10,2	92	Одрони, минирање
Аргентера	Шпанија	1887-1890	4	14	Повеќе фактори
Симплон I	Швајцарија/Италија	1898-1906	19,8	67	Висока температура, експлозии
Готард	Швајцарија	1969-1980	16,9	19	Механички несреќи, минирање
Сан Готард	Швајцарија	1970-1980	8	6	Колапс
Тауерн	Австрија	1971-1975	6,4	4	Колапс
Сеикан	Јапонија	1971-1987	90	36	Продор на вода, колапс на свод
Фрејус	Франција/Италија	1974-1980	12,9	5	Одрони, минирање
Даи-Шимизу	Јапонија	1978-1982	22,2	16	Пожар
Евротунел	Ламанш	1988-1994	50,5	13	Повеќе фактори
Хсуешшан	Тајван	1991-2006	12,9	25	Поплави, колапси
Готард	Швајцарија	1999-2016	57,1	9	Повеќе фактори
Бренер	Австрија/Италија	2007-2025*	55	3	Удар од механзација
Кросреил	Англија	2012-2015	42	1	Пад на прскан бетон

Фазата на изградба претставува најголемиот генератор на непосакувани настани-хазарди, кои доколку не се предвидат може да создадат сериозни ризици. Затоа оваа област се повеќе се истражува со цел да се пронајдат подобри решенија и мерки за ризиците (Табела 2.4).

Табела 2.4 Најчестии хазарди при изградба на тунелише и мерки за намалување на ризицише (повеќе извори)

Хазард	Влијателни параметри	Мерки за намалување на ризиците
Пукање и/или распаѓање на карпестите маси	Тип и јакост на карпата; Состојба на напрегања; Раседи; Геометрија на тунелот; Метод на изградба.	Специјални видови на анкери; Контролирано минирање (со минимално пореметување на околната средина).
Прекумерни деформации	Бабрење (присуство на вода, минерални својства); Гмечење (тип на терен, надслој); Метод на изградба.	Репрофилирање на деформираната секција; Употреба на попустливи елементи (yielding elements); Модификација на формата/димензиите на попречниот профил; Модификација и поставување на подградба во подножниот свод (при бабрење); Специјални видови на анкери.
Одрони	Дисконтинуитети; Геометрија на тунелот; Состојба на напрегања; Доток на вода; Метод на изградба.	Анкери; Прскан бетон; Исполнување на шуплината (отворот) со бетон и арматура; Зајакнување со бетонски контрафор (при екстремно големи блокови).
Поплавување	Водопропусност; Состојба на пукнатини; Хидростатички притисок; Раседи; Издани.	Дренирање (примена на пумпи; однапред или од површината); Инјектирање; Обиколен (bypass) тунел.

Колапс (рушење)	Тип на терен; Раседи/раседни зони; Присуство на други конструкции; Доток на вода; Прекумерни деформации; Метода на изградба; Надслој.	Исполнување на тунелот со материјал (бетон, карпа/почва, песочни вреќи) за непосредна стабилизација и спречување на понатамошен колапс; Стабилизација на челото и калотата со прскан бетон; Претходно подградување (анкери, пред-свод, цевен чадор, микро колови и сл.); Дренарање (доколку причината е доток на вода); Модификација на методот на ископ и подградбата (ископ во повеќе фази, пилот тунел); Инјектирање (однапред или од површината) за консолидација; Замрзнување на теренот; Промена на методот за изградба (пр. од ТВМ машини на Drill&Blast метод); Во екстремни случаи, промена на трасата или напуштање на тунелот; Доколку колапсот достигнува до површината, покрај овие има и дополнителни мерки.
Пожар и експлозија	Присуство и количини на запаливи материјали; Вентилација; Геометрија на тунелот; Присуство на прашина или пареа.	Контрола на изворите за запалување, гасовите, прашина и пареата; Принудна вентилација; Систем за рано откривање на пожар; Примена на огнооптпорни материјали.

Хазардите кај тунелите главно се проследени со финансиски (економски) и временски последици, а поретко и со човечки последици. Од аспект на влијанија врз животната средина, подземните конструкции имаат многу позитивни карактеристики, а во многу случаи претставуваат најдобри решенија за проблемите во оваа област. Во (Табела 2.5) претставени се тунели низ светот кои се проследени со големи монетарни и временски загуби.

Табела 2.5 Тунели проследени со големи ризици во период од 1994 до 2025 година (повеќе извори)

Проект	Локација	Година на настан	Метод на градба	Настан	Загуба во милиони евра	Загуба во месеци
Great Belt Link	Данска	1994	ТБМ	Поплава	/	8
				Пожар	30	9
Munich Metro	Германија	1994	НАТМ	Колапс	4	10
Heathrow Express Link	Британија	1994	НАТМ	Колапс	130	14
Taipei Metro	Тајван	1994	ТБМ	Колапс	11	12
Los Angeles Metro	САД	1995	ТБМ	Колапс	8	15
Taipei Metro	Тајван	1995	ТБМ	Колапс	27	18
Hull Yorkshire	Британија	1999	ТБМ	Колапс	51	26
Anatolian Motorway	Турција	1999	НАТМ	Земјотрес	105	36
TAV Bologna - Florence	Италија	2000	НАТМ	Колапс	11	/
Taegu Metro	Ј. Кореја	2000	Cut&Cover	Колапс	22	9
Taiwan High Speed	Тајван	2002	НАТМ	Колапс	28	0
SOCATOP Paris	Франција	2002	НАТМ	Пожар	7	/

Shanghai Metro	Кина	2003	Со замрзнување	Колапс	74	47
Singapore Metro	Сингапур	2004	Со дијафрагми	Колапс	10	8
Lausanne Metro	Швајцарија	2005	НАТМ	Колапс	11	<12
Kaohsiung Metro	Тајван	2005	ТБМ	Колапс	28	/
Pinheiros Station, Sao Paulo Metro	Бразил	2007	НАТМ	Колапс	23	24
Cologne Metro	Германија	2009	Со дијафрагми	Колапс	€1,3 милијарди (проценети) €600 милиони (исплатени)	
SR-99 'Bertha'	САД	2013	ТБМ	Оштетување на ТБМ	53	/
Rastatt Tunnel	Германија	2017	ТБМ	Колапс	>€2 милијарди	/
Foshan Metro Line 2	Кина	2018	ТБМ	Колапс	7	/
Guangzhou Metro Line 11	Кина	2019	ТБМ	Колапс	2,6	/
Silkyara-Barkot	Индија	2023	ТБМ и минирање	Колапс	41 работник заробени 17 денови	
Los Angeles Effluent Outfall Tunnel	САД	2025	ТБМ	Колапс	31 работник заробени (ист број како во 1995) околу 1 час	

Може да се забележи дека постојат различни причини (хазарди) кои предизвикале сериозни и катастрофални последици кај големите тунелски проекти во светот. Во однос на човечки последици во денешната изградба на тунелите, има тенденција на намалување, со што оваа појава денес најчесто се сведува на повреди, а поретко смртни случаи. Спротивно од тоа зголемените трошоци и време на тунелските проекти се континуиран процес чиј интензитет зависи од големината и комплексноста на проектот. Кај дел од претставените тунели, па дури и оние од понов период, нема анализа на ризиците како посебен дел од проектот. Во најголем дел од случаите процесот на управување со ризици е започнат после настанување на сериозен hazard. Во (Табела 2.6) е претставено како дел од големите тунелски проекти низ светот се справувале со ризиците.

Табела 2.6 Тунелски проекти и начини на управување со ризиците (повеќе извори)

Проект	Локација	Година на настан	Метод на градба	Настан	Управување со ризиците
Great Belt Link	Данска	1994	ТБМ	Поплава и Пожар	По пожарот и полавата се ревидирани HSE протоколите; ITA-AITES WG2 (1996) препорача систематско управување со пожарен ризик и планови за непредвидени ситуации.
Munich Metro	Германија	1994	НАТМ	Колапс	Воведени локални насоки за мониторинг и дневна проверка на конвергенција; создадени први inter-event risk листи во Минхен.
Heathrow Express Link	Британија	1994	НАТМ	Колапс	По колапсот воспоставен е регистар на ризици и дневна пракса за процена на ризици; Станува основа на британските регулативи за изградба.

Taipei Metro	Тајван	1994	ТБМ	Колапс	Инцидентот поттикнал воспоставување на централизирана единица во Taipei DORTS со геолошки мониторинг.
Los Angeles Metro	САД	1995	ТБМ	Колапс	По настанот, градот усвоил задолжителна независна програма за геотехничка ревизија.
Taipei Metro 2	Тајван	1995	ТБМ	Колапс	Ревидирани безбедносни протоколи за урбани ТБМ-траси; Додаден 24 h надзор за инструментација.
Hull Yorkshire	Британија	1999	ТБМ	Колапс	Воведено замрзнување како метод за итни состојби и пост ризик обука за работници.
Bolu	Турција	1999	НАТМ	Земјотрес	По настанот усвоени се протоколи за сеизмички ризик и ISO 14001 рамка за безбедност
TAV Bologna - Florence	Италија	2000	НАТМ	Колапс	Додадени сензори за во реално време и геомониторинг во Апенините по инцидентот.
Taegu Metro	Ј. Кореја	2000	Cut&Cover	Колапс	Воведени урбани контролни стандарди HSE-KOSHA и геотехничка ревизија пред одобрување.
Taiwan High Speed	Тајван	2002	НАТМ	Колапс	Проектот усвоил квалитативна анализа на ризици и пробабилистичко проектирање за НАТМ секции.
SOCATOP Paris	Франција	2002	НАТМ	Пожар	Воведени матрици за ризик од пожар и вежби за итни случаи во затворени тунели.
Shanghai Metro	Кина	2003	Со замрзнување	Колапс	Засилена инженерска ревизија и сценарија за ризици од воден продор и ерозија.
Singapore Metro	Сингапур	2004	Со дијафрагми	Колапс	Воведени нови стандарди за дијафрагми стандард и задолжителна ревизија на ризик од Транспортната Агенција.
Lausanne Metro	Швајцарија	2005	НАТМ	Колапс	Усвоен континуиран мониторинг и обука по ревизија на инциденти.
Kaohsiung Metro	Тајван	2005	ТБМ	Колапс	Воведени нови контроли за инфилтрација на вода и прецизни геодетски мерења мониторинг на деформации.
Pinheiros Station, Sao Paulo Metro	Бразил	2007	НАТМ	Колапс	По несреќата воведени се дополнителни геотехнички контроли и ревизии на методологијата за градење.
CologneMetro	Германија	2009	Со дијафрагми	Колапс	Усвоени нови стандарди за независен надзор и мониторинг на длабоки ископи.
SR-99 'Bertha'	САД	2013	ТБМ	Оштетување на ТБМ	По оштетувањето е воведен интегриран систем за управување со ризици (регистар на ризици, независен геотехнички надзор, план за замрзнување и 24/7 мониторинг)
Rastatt Tunnel	Германија	2017	ТБМ	Колапс	Воведување итен каталог на мерки и деформациски мониторинг во реално време.

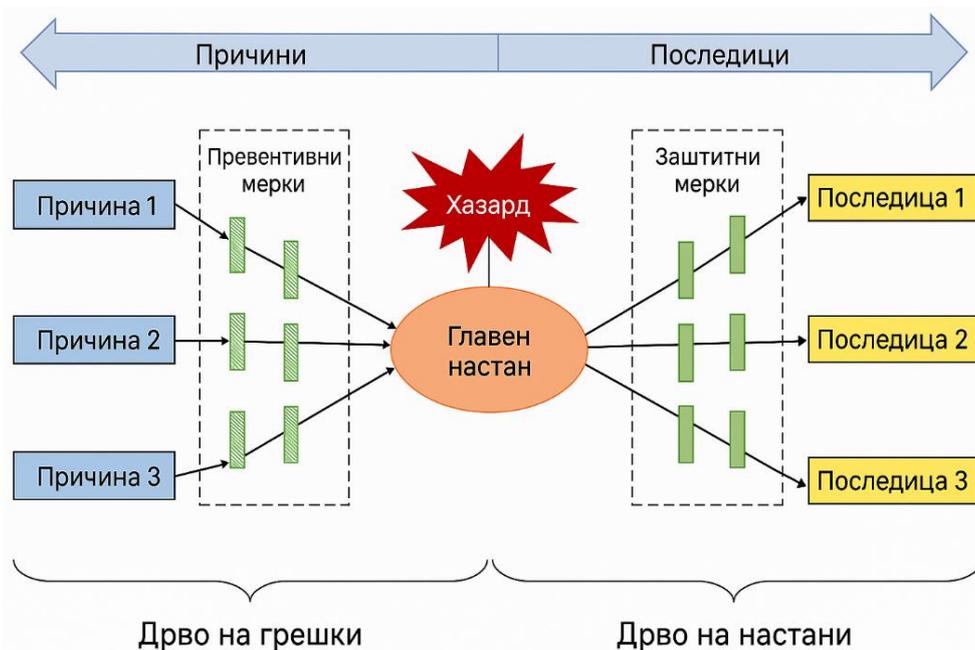
Foshan Metro Line 2	Кина	2018	ТБМ	Колапс	Препорачан SAR (Synthetic Aperture Radar) и геофизички мониторинг за предвидување на водни продори.
Guangzhou Metro Line 11	Кина	2019	ТБМ	Колапс	Ревидирани процедури за осигурување на коловозот над тунелот и построги контроли.
Silkyara-Barkot	Индија	2023	ТБМ и минарање	Колапс	Препорачан е засилен геофизички мониторинг и безбедносни ревизии.
Los Angeles Effluent Outfall Tunnel	САД	2025	ТБМ	Колапс	Проектот има Design-Build Risk Plan и ISO 45001. По настанот се оценува ефективноста на кризното управување.

3. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА И ИСТРАЖУВАЊА ЗА РИЗИЦИТЕ КАЈ ТУНЕЛИТЕ

Во светот, постојат повеќе истражувања поврзани со ризици кај тунелите. Помошните алатки за донесување одлуки кај тунелите (Decision Aids for Tunneling), развиени во 90-тите години на минатиот век во Институтот за технологија во Масачусетс (MIT), претставуваат софтверско решение, кое е меѓу првите што зема во предвид несигурности поврзани со тунелоградбата. Со геолошките услови, процесот на градба и ресурсите како влезни податоци, овој софтвер користи алгоритми, Марков процес и Монте Карло симулација за да го предвиди времето и трошоците за градење (Einstein, Indermitte, Sinfield, Descoeudres, & Dudt, 1999).

Во 2005 година предложен е сличен модел за процена на времето и трошоците за изградба базиран на ризиците (КТХ модел). Сепак нивното истражување е повеќе ориентирано на ископ со кртица (подземна машина за ископ-ТБМ) како и самиот начин на добивање податоци преку оваа машина (Isaksson & Stille, 2005).

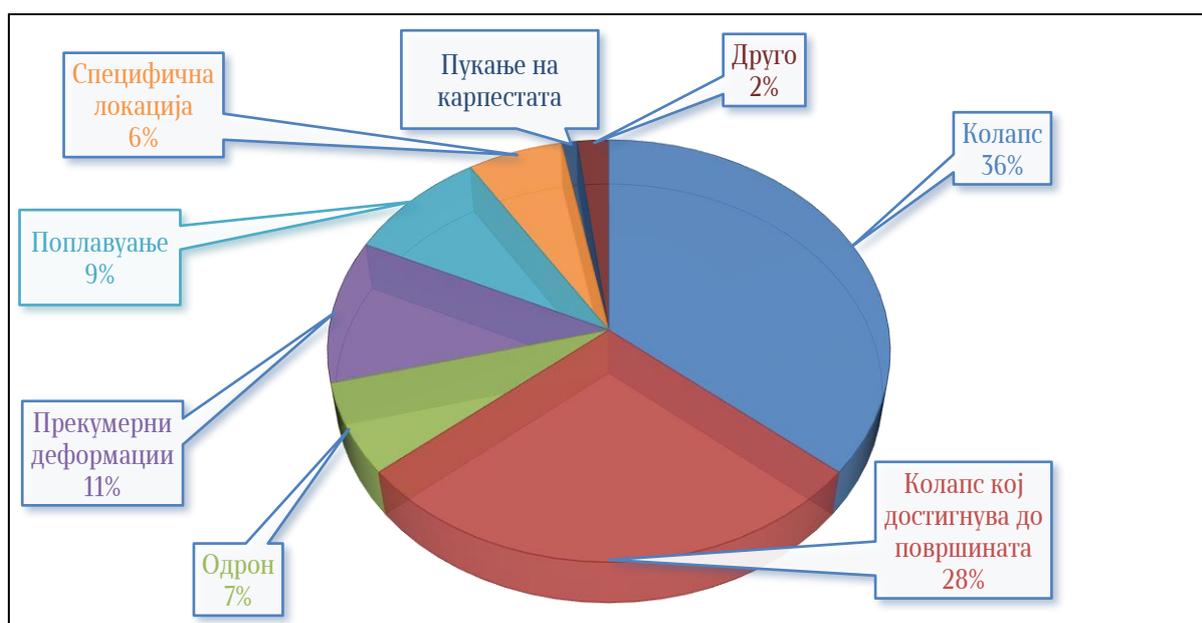
Едно од првите упатства поврзано со ризиците кај тунелите издадено е од интернационалната асоцијација за тунели (ITA-International Tunnelling Association) во 2004 година и истото дава генерални насоки околу компонентите на управувањето со ризиците (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004). Во упатството споменати се одредени пристапи кои главно може да се користат за процена на ризици како: дрво на грешки, дрво на одлуки, дрво на настани, симулацијата Монте Карло и сл. Постојат повеќе истражувања во литературата кои користат комбинации на анализа на дрвата (Слика 3.1), а во одредени случаи и дополнителна пробабилистичка анализа и Монте Карло симулација (Pamukcu, 2015; Vanorio & Mera, 2012; Sharafat, Latif, & Seo, 2021). Резултатите од овие методи, можат да обезбедат основа за контрола на ризиците и подобрување на безбедноста на тунелските проекти. Но, повеќето од овие методи ги анализираат проблемите субјективно и помала е веројатноста дека сеопфатно ги карактеризираат ризиците кај тунелите.



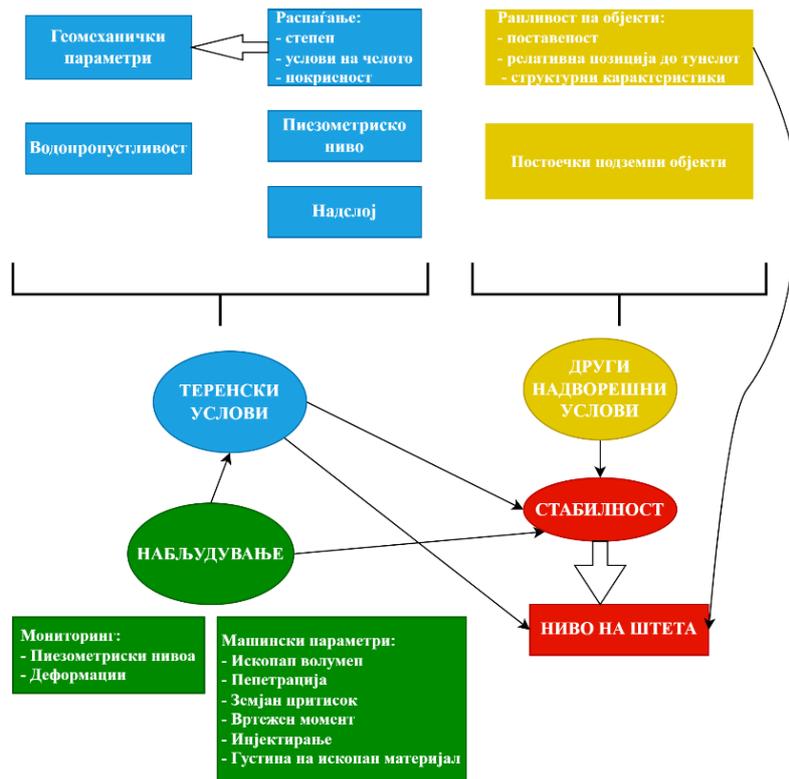
Слика 3.1 Комбинација на дрво на грешки и дрво на настани (познато и како Bow-tie risk analysis-анализа на ризици машина) (Sharafat, Latif, & Seo, 2021)

Еден пристап на истражувачи од Кина, се базира на комбинација на дрвото на грешки (Fault Tree Analysis-FTA) и моделот 24 (Behavior security “2-4” Model). Со оваа развиена метода, анализирани се причините за несреќи со четворо-модулен пристап. Првично е направена емпириска студија со преземање на податоците за големиот колапс на градилиштето на метро линијата 11 во Гуангжу. Во споредба со извештајот за несреќата, методот FTA-24Model прави систематски логичка врска помеѓу причините за несреќата и дава панорама од ланец на причини за несреќа и неговиот процес на еволуција, а исто така ги идентификува клучните причини за несреќи и ризикот од нивно спојување (комбинирање). Овој пристап претставува еден вид на повратна анализа, која после одредена несреќа, анализира логична и детална причина за нејзината појава (Fang, Zhang, Zhu, & Chen, 2022).

Рита Л. Соуса во нејзината докторска дисертација истражува околу несреќите кои се случиле при изградба на тунели низ светот, како и методологија за процена на ризици во фаза на проектирање и изведба. Според нејзиното истражување добиени се информации за околу 200 случаи на хазарди во 132 тунели низ светот до 2010 година (Слика 3.2). Податоците се однесуваат на различни типови на тунели, кои се градени на различен начин при поинакви опкружувања и услови. Овие хазарди не го претставуваат најголемиот број на настани кои се случуваат при изградба на тунелите, туку тие се најчесто пријавени во литературата и од страна на експертите, поради сериозните последици кои ги предизвикуваат врз процесот на изградба, безбедноста на работниците, луѓето и околните (површинските) објекти. Методологијата за процена на ризици и донесување на одлуки е направена со користење на Бајесови мрежи. Конкретниот пример кој е разработен со оваа методологија се однесува на 2 метро тунели во Португалија (Порто Метро), каде се имаат случено 3 несреќи (колапси) во 2001 година. Пробивањето на тунелите реализирано е со машина (кртица) со штит (Earth Pressure Balance Shield-ЕПБ ТБМ). Во проектната фаза влезните податоци (променливи) се: распаѓање на карпеста маса, водопропустливост, ниво на подземна вода, надслој, геомеханички параметри и повредливост на околни објекти. Во фазата на изградба податоците на ТБМ (волумен и густина на ископан материјал, пенетрација, земјан притисок, вртежен момент и волумен на инјектирање) се ажурираат со континуирано со напредување на тунелот (Слика 3.3). На крајот, добиена е комбинација на два модели, каде првиот модел овозможува да се предвиди геологијата пред машината за ископ (ТБМ), а со вториот модел се прави одлука за избор на стратегија за градење. Со ваквата комбинација на модели може да се процени ризикот, а потоа да се намали со соодветни стратегии за изградба. При истражувањето детално е разгледан и начинот на пробивање со ваков тип на машини (Sousa, 2010).

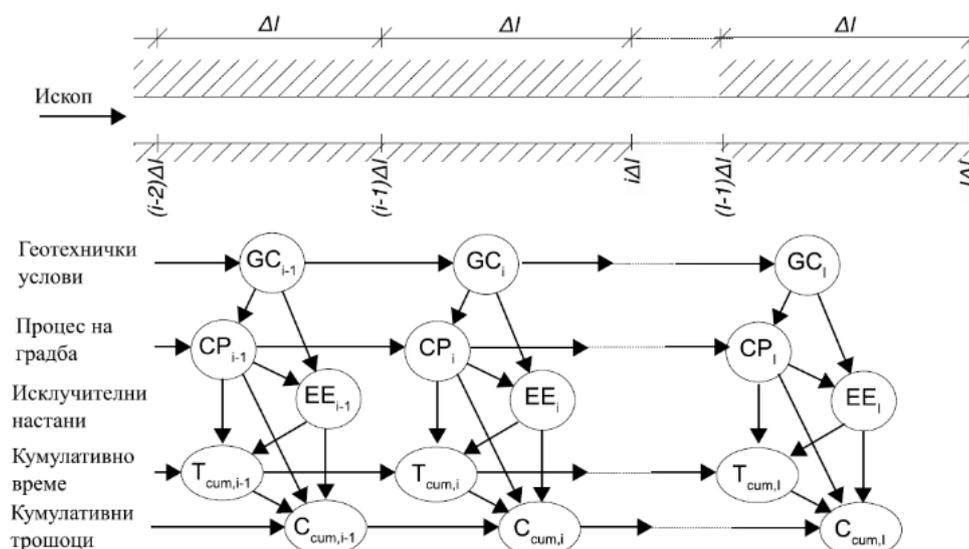


Слика 3.2 Дистрибуција на хазарди при изградба на 132 тунели низ светот (Sousa, 2010)



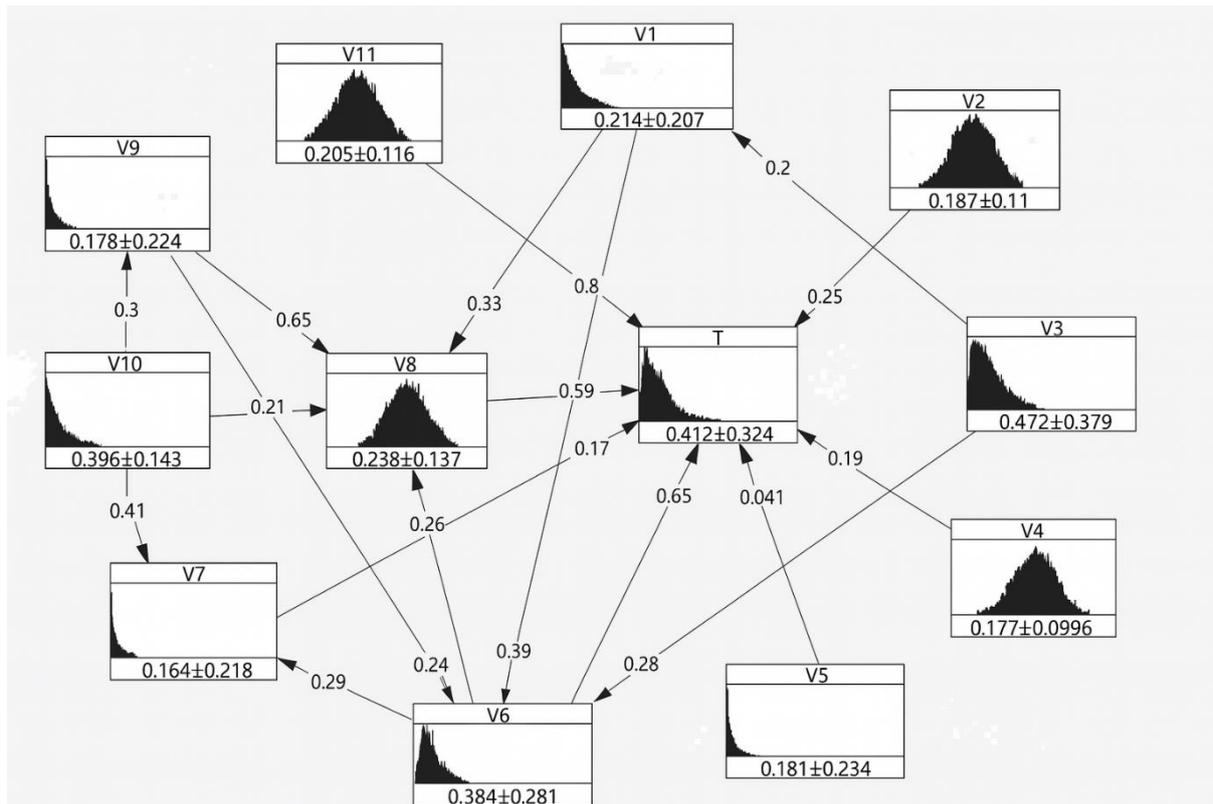
Слика 3.3 Дијаграм на влијание за тунелот во Порто Мейро (Sousa, 2010)

Во друга докторска дисертација од 2012 година повторно е истражувана проблематиката за ризици кај тунелите со користење на Бајесови мрежи. Олга Шпачкова навлегува подетално во динамичките Бајесови мрежи (Слика 3.4), кои претставуваат посебен случај на Бајесови мрежи, кои се користат за моделирање на случајни променливи. Променливите во оваа специфична мрежа се: квази-хомогени геотехнички зони, класи на карпи, надслој, перформанси на изградба, модел на лом, број на ломови и време на градење. Анализата со предложениот модел е направена со податоци од 3 тунели во Чешка. Резултатите главно се однесуваат на времето на градење при различни сценарија. Едно од сценаријата поврзано со ризиците е процена на доцнењето на градба во однос на хазарди (ломови) (Špračková, 2012).



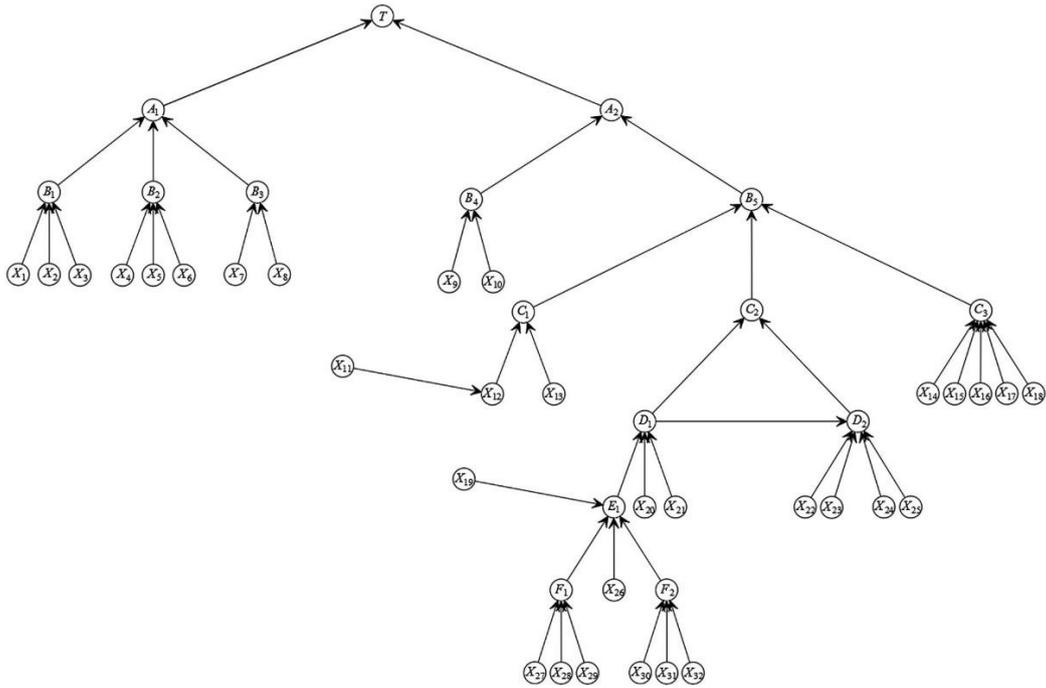
Слика 3.4 Пример од јазлиите на динамичка Бајесова мрежа за процесот на изградба на тунел (Špračková, 2012)

За подводен метро тунел во фаза на експлоатација имплементиран е хибриден Копула-Бајесов модел (Copula-Bayesian). Целта на овој метод е, да се открие интеракцијата на латентните фактори на ризик кои се закануваат на конструктивната состојба на метро тунелите во експлоатација. Копула-Бајесовиот модел за процена на ризици е типично континуирана и динамична состојба на веројатност со различни потенцијални ризици. Истиот е корисен за проценката на ризикот во реално време во зависните системи со ажурирање на веројатностите на одредени јазли пред и по конструктивен лом, врз основа на контрола на ризикот напред и назад. Како влезни променливи-основни јазли во Бајесовата мрежа (Слика 3.5) користени се параметри за пукнатини и споеви на облогата, течење на вода и диференцијални слегнувања (Yue, et al., 2019).



Слика 3.5 Развиен Копула-Бајесов модел за процена на состојбата на тунели во експлоатација (Yue, et al., 2019)

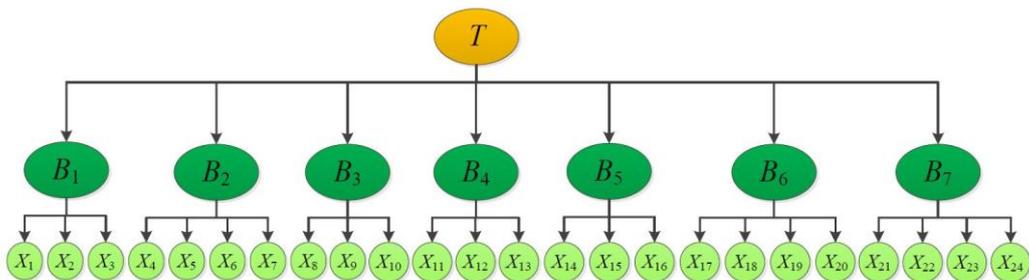
Група инженери од Кина во 2022 даваат метод за одлука за ризици базиран на докази при изградба на метро тунели. Во нивното истражување се прави трансформација на динамичко дрво на грешки во континуирана временска Бајесова мрежа (Слика 3.6). Ова овозможува повеќедимензионални информации да се користат како доказ за да се помогне при донесување на одлуки преку просторна декомпозиција на ризици во тунелски проект. Во фазата пред изградба, информациите за експертските мислења, параметрите специфични за проектот и историските податоци се спојуваат во моделот како докази за да се изврши предвидлива анализа и анализа на важност, а резултатите можат да помогнат во одлуката за оценување на прифатливоста на опасниот настан и формулирање стратегии за одговор за факторите на ризик. Во фазата на изградба одредени докази извлечени од инженерските аномалии можат да ја ажурираат предвидливата анализа, а дијагностичката анализа може да се изврши со одредени докази извлечени од информациите за откривање на несреќи за да помогне во откривањето на причините за hazardot. Оваа анализа се однесува на ризик од течење на вода во тунел во урбана средина, граден со помош на машина-кртица со штит (ЕПБ ТБМ), а самите податоци во дрвата и мрежата се поврзани со неа (Guo, Zheng, Zhang, & Yang, 2022).



Слика 3.6 Пример од еквивалентен модел на континуирана временска Бајесова мрежа за итечење на вода во тунел (Guo, Zheng, Zhang, & Yang, 2022)

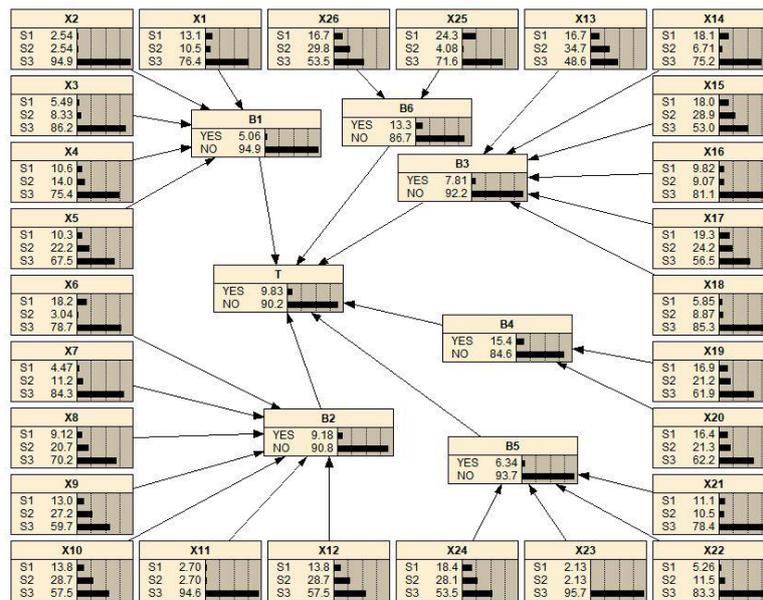
Исто така, во 2022 година од неколку истражувачи од Кина (Wu, et al., 2022), воспоставена е нова методологија за процена на динамички ризик за уривање (колапс) на тунелот, која ги комбинира моделот Облак (Cloud Model-CM), функцијата Членство (Membership function) и Бајесовата мрежа. Разгледуваниот пример се однесува на едната тунелска цевка од автопатски тунели во Кина по чија вкупна должина од 900m се наоѓаат две раседни зони. Предложената методологија за процена на ризиците се состои од 4 чекори:

- Идентификација на ризици/хазарди на база на претходни истражувања и податоци;
- Воспоставување на Бајесова мрежа каде што потенцијалните ризици/хазарди и нивните односи се одредуваат, а потоа се идентификуваат јазлите на мрежата (Слика 3.7);
- Воспоставување на табелите за условна веројатност (conditional probability tables (CPT): Тежинските коефициенти на факторите на ризик се претвораат во веројатности за дистрибуција преку нормалниот генератор на облак, и на крајот се добива табела за условна веројатност;
- Пресметка на вредноста на ризик од колапс со комбинирање на предложени степени на изложеност и тежински коефициенти на ризик.



Слика 3.7 Структура на ризични фактори за колапс во тунел (Wu, et al., 2022)

Постојат и фази Бајесови мрежи кои се применети за процена на ризици при изградба на метро тунели со минирање во 2023 година. Прво, врз основа на идентификацијата на главните фази на процесот на изградба, направен е систем на индекси за процена на ризици според структура за расчленување на ризик (Risk Breakdown Structure). Второ, со комбинирање на теоријата на фази множества, аналитичкиот хиерархиски процес и Бајесови мрежи, воспоставен е динамички модел за процена на ризици. Овој модел е применет за дел од метро линијата во Вухан-Кина. Влијателните фактори (Слика 3.8) се однесуваат на параметри за цевен чадор, ископ на тунелот, примарна подградба и хидроизолација, секундарна подградба и мониторинг (Wang, et al., 2023).



Слика 3.8 Фази Бајесов пресмејковен модел (Wang, et al., 2023)

Фази логиката (Fuzzy logic) се почесто се користи во оваа област, со што може да се најдат разни комбинации на модели. Во 2014 година се користи модел кој го заменува индексот на ризик (производ од веројатност и последица) со фази функција, притоа анализирајќи голем број на ризици. Како пример, анализиран е тунел во Иран со должина од 26km кој е граден со машина со двоен штит (Double shield ДС-ТБМ). Идентификуваните ризици се поделени во 4 главни групи, а потоа во категории и настани (Табела 3.1). За секој настан проценети се веројатности како влезен податок и рангирања како излезен податок со и без фази логика (Yazdani-Chamzini, 2014).

Табела 3.1 Пример на идентификувани ризици и нивна главна поделба (Yazdani-Chamzini, 2014)

Група	Категорија	Дел од настаните кои влијаат на категориите
Технички ризик	Планирање	Проблеми со експропријација
	Проектирање	Недостаток на искусни проектанти
Конструктивен ризик	Геологија	Раседи
	Безбедност	Колапс
	Здравје и околина	Бучава и загадување на воздухот
Проектен ризик	Препреки	Оштетување на темели на соседни згради
	Квалитет	Несоодветен избор на материјали и механизација
	Време	Доцнење при набавка на материјали
	Човечки ресурси	Недостаток на стручен кадар
Надворешни ризици	Чинење	Пораст на цени на материјали и работници
	Договори	Доцнење при исплата
	Финансии	Финансиски проблеми

Фази аналитички хиерархиски процес (ФАХП) применет е од страна на различни истражувачи. Во 2020 година е истражуван ФАХП како ефективен метод за процена на ризици во кој се користени анкети за собирање на податоци од експерти. Предложениот консултативен процес се состои од ново дизајнирана анкета и нов пристап за одредување фази броеви. Во ова истражување анализирана е изградбата на метро тунелски систем во Кина, кој се гради во зона со голем потенцијал на подземна вода. Резултатите покажуваат дека матрицата за процена утврдена од новата анкета, може да определи триаголни фази броеви и да воспостави конзистентна матрица за процена (Lyu, Sun, Shen, & Zhou, 2020). Во 2022 година ФАХП го користат неколку истражувачи од Италија и Иран. Анализирани се 12 потенцијални ризици (Слика 3.9) за еден тунел со должина од 5,6km на основа на претходно истражена литература. Поклопувањето помеѓу условите во проектот и резултатите добиени од пресметките и рангирањето на ризиците, покажува дека ФАХП е релевантен пристап за проценка и рангирање на ризиците со високо прифатливи степени на прецизност и робусност. Но, пресметаните вредности за секој ризик и нивното рангирање се единствени, и тие се применливи само кај проектот во истражувањето (Haghshenas, Abduelrhman, Zare, & Mikaeil, 2022).

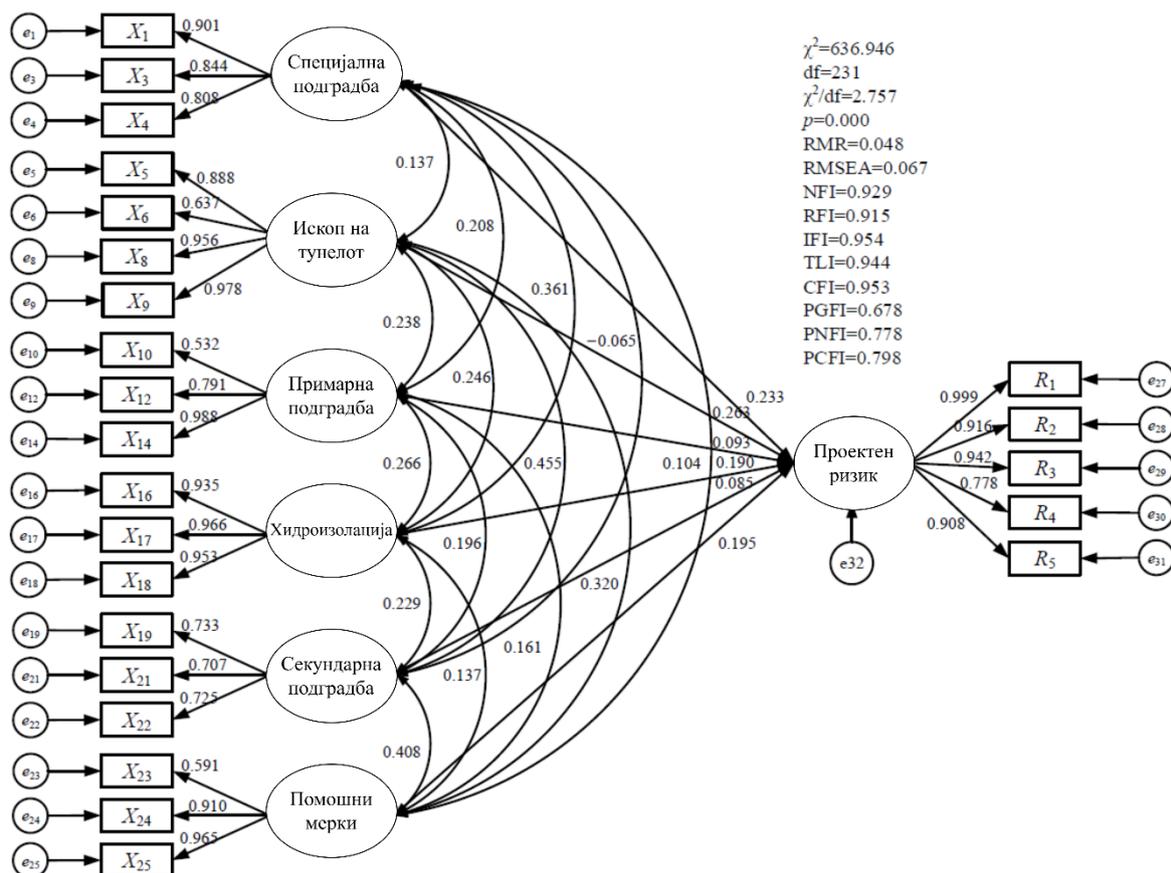


Слика 3.9 Рангирање на проценети ризици според фази аналитички хиерархиски процес (Haghshenas, Haghshenas, Abduelrhman, Zare, & Mikaeil, 2022)

Факторите кои влијаат на несреќи при изградба на патни тунели, истражени се во Кина во 2022 година. Врз основа на втемелената теорија (grounded theory) која претставува квалитативен метод на истражување за генерализирање на искуството преку директно набљудување, апстракција и анализа на податоците, со користење на софтвер (NVivo11), анализирани се извештаи и добиени се соодветни кодови од оваа теорија. Дополнително, конструиран е теоретски модел на фактори кои влијаат на несреќите при изградбата на тунел, со кој се поминува тестот за заситеност (saturation test). Моделот DEMATEL (The Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory) се користи за анализа на механизмот на влијание и односите на интеракција на овие фактори. Двете димензии на степенот на влијание и централноста се користат за одредување на критичните фактори кои влијаат на несреќите при изградба на патни тунели. Главните групи на фактори (влезни податоци) кои се користат се: човечки и материјални фактори, топографска геологија и климатски услови, истраги и проектирња, менаџмент и информациона изградба. Со овие фактори се прави директна матрица на влијание и потоа индекс на влијание. Резултатите покажуваат дека управувањето со безбедноста и контролата на квалитетот имаат најголемо влијание. (Yang, Wang, Easa, & Yan, 2022).

Покрај „класичните“ тунелски решенија во 2021 година направено е истражување за процена на ризици кај плиток тунел со двоен лачен попречен профил. Истражуваниот тунел со должина од 157m се наоѓа во градот Шиамен во Кина на длабочина од само 5m под постоечки пат. Процесот на изградба поделен е во пет фази со воспоставување на системот на индекси за динамичка процена на ризик. Главните индекси (групи) на ризик содржат геологија и хидрологија, околни конструкции и инсталации, технологија на изградба, менаџмент и податоци за мониторинг. Референтниот тежински коефициент на индексот за процена на динамичкиот ризик се одредува со аналитичкиот хиерархиски процес (АХП), а потоа тежинскиот коефициент се модифицира според фазата на изградба. Промените во тежинските коефициенти влијаат на резултатите од процената на ризикот. На крај, усвоен е методот на фази сеопфатна евалуација за да се оцени ризикот од секоја фаза и да се предложат мерките за контрола на ризикот (Wang, et al., 2021).

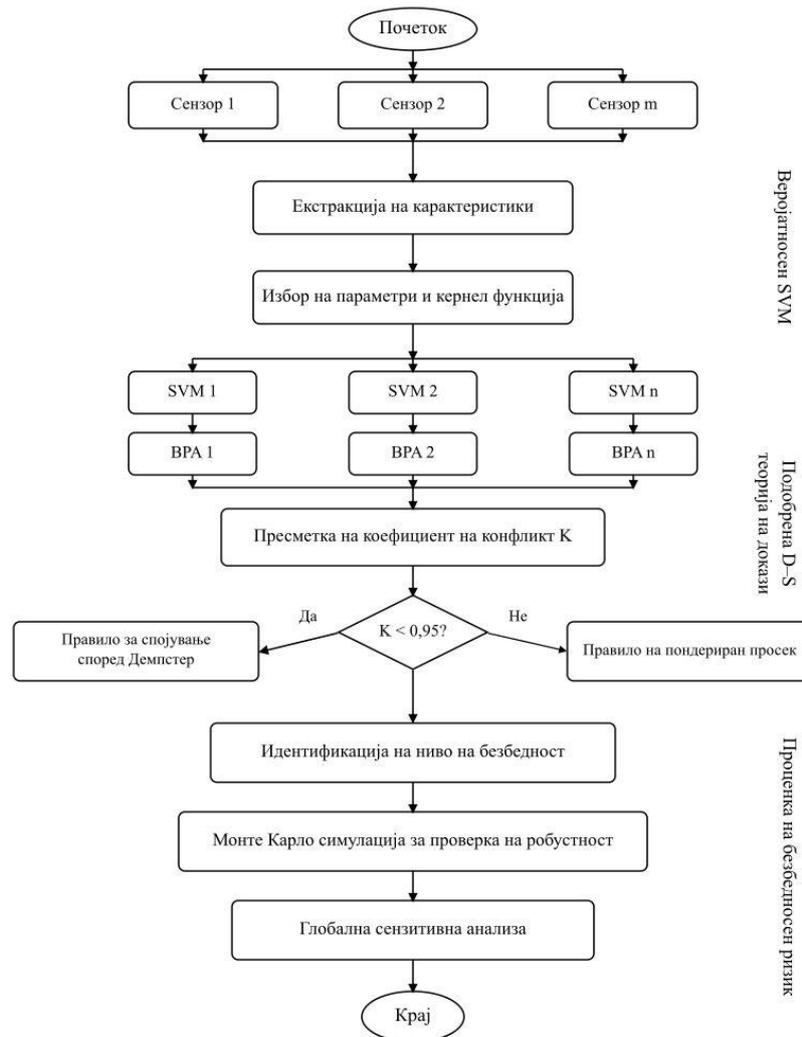
Во 2023 година, развиен е хибриден метод врз основа на моделот на структурни равенки (structural equation model) и фази когнитивна мапа (fuzzy cognitive map), кој служи за проучување на влијанијата на безбедносните hazards при изградба на метро тунели со минирање врз проектните ризици (Слика 3.10). Овој метод овозможува објективна карактеризација на субјективни податоци. Може да ја интегрира идентификацијата на факторите на ризик со динамичкото предвидување и расудувачка дијагноза, што води до подобра усогласеност помеѓу процената на ризикот и практичните услови кај реални проекти (Wang, Xiong, Zhu, & Guo, 2023).



Слика 3.10 Моделот на структурни равенки за процена на ризик кај метро тунел изграден со минирање (Wang, Xiong, Zhu, & Guo, 2023)

Еден поразличен пристап применет е за метро тунел во експлоатација, со користење на пробабилистичка потпорна векторска машина (probabilistic support vector machine) и подобрена теорија на докази на Демпстер-Шаферов, за да помогне при анализата на ризици во услови на

несигурност (Слика 3.11). Резултатите од повеќекратната класификација се споени на ниво на одлука за да се постигне севкупна процена на ризикот со подобрена теорија на докази, со интеграција на правилото на Демпстер и правилото на пондериран просек. Монте Карло симулациониот пристап се користи за моделирање на случајноста и несигурноста во основата на ограничените набљудувања. Овој модел е искористен за процена на магнитудата на структурен ризик на изграден тунел во Вухан-Кина. Влезните податоци во анализата претставуваат реални мерења од сензорите во тунелот во однос на оштетување на материјал, оштетување од протекување, деформација на сегменти и ризик од надворешни товари (Pan, Zhang, Wu, & Skibniewski, 2020).



Слика 3.11 Дијаграм за предложен хибриден пристап за одлука со повеќе класификации (Pan, Zhang, Wu, & Skibniewski, 2020)

Неколку истражувачи користат алатки за вештачка интелигенција за предвидување на геологијата, времето и трошоците за изградба на патен тунел во Иран. Гаусовиот процес на регресија и потпорната векторска регресија (Gaussian Process Regression (GPR) and Support Vector Regression (SVR)) се двата модела кои се користени паралелно за да се предвиди, прво RMR (Rock Mass Rating), а потоа врз основа на различни RMR состојби (вредности), и историски податоци од вакви слични тунели, да се предвиди времето и трошоците за градење (Табела 3.2). Анализираниот патен тунел долг е 1900m со попречен пресек од 97m² со две сообраќајни ленти.

Прво, направено е предвидување со податоци за 200m од тунелот, а после завршување на изградбата со податоците од целиот тунел. Резултатите од ова истражување покажуваат дека GPR има поголема точност од SVR (Mahmoodzadeh, et al., 2020).

Табела 3.2 Процена на време и цена по метар за различни RMR интервали кај тунели со слични карактеристики (Mahmoodzadeh, et al., 2020)

RMR интервал	Време по метар (денови)	Цена по метар (US\$)
0-5	0,90	6126
5-10	0,80	6088
10-15	0,76	6007
15-20	0,71	5900
20-25	0,74	5878
25-30	0,65	5872
30-35	0,57	5854
35-40	0,48	5744
40-45	0,42	5659
45-50	0,40	5540
50-55	0,36	5403
55-60	0,33	5295
60-65	0,36	4858
65-70	0,36	4784
70-75	0,35	4620
75-80	0,34	4507
80-85	0,29	4349
85-90	0,30	4244
90-95	0,24	4024
95-100	0,26	3851

Во нашата држава има одредени претходни истражувања за тунелите, кои генерално се посветени на еднодимензионални модели (Jovanovska, Togo, & Gacevski, 2019; Гацевски, Недевска, Лазаревска, & Зафировски, 2021), помал број на тунели (Zafirovski, Gacevski, Krakutovski, Ognjenovic, & Nedevska, 2021) и насоки за процесот на управување со ризици (Zafirovski, Moslavac, Glavinov, Krakutovski, & Gacevski, 2019; Zafirovski, Gacevski, Lazarevska, & Ognjenovic, 2019; Gacevski, Lazarevska, Zafirovski, & Nedevska, 2021). Има и истражување кое се фокусира на дефинирање на својствата на карпестите маси при напонско-деформациони анализи кај тунели, каде што се направени прогнозни модели за RMR и поместувањата, а ризикот е третиран од проектантски аспект, односно веројатност на лом во различни проектни фази (Зафировски, 2014). Во овие истражувања, главно се анализирани класичните пристапи за проценка на ризиците кај различни типови на тунели и елементите кои треба да ги содржи процесот за управување со ризици.

Покрај ова, постојат и голем број истражувања поврзани со специфични начини и услови на изградба, како што се: различните типови на машини за ископ (ТБМ), подводни и потопени тунели, Cut&Cover тунели, подземни станици, галерии, окна и сл. Во следната (Табела 3.3) претставена е листа на други истражувања кои се поврзани со управувањето со ризици при реализација кај тунелските проекти.

Табела 3.3 Листа на истражувања поврзани со управување со ризици кај проекти за тунели (повеќе извори)

Референца	Информација за тунел	Метод за изградба	Методи/модел за ризици	Анализирани ризици
(Hyun, Min, Choi, Park, & Lee, 2015)	Метро со минимален надслој од 8m	ТБМ со штит	Комбинација на дрво на грешки и АХП	Ризици поврзани со работата на ТБМ
(Membah, 2016)	Повеќе патни	ТБМ	Регресиона анализа и Монте Карло симулација	Параметарски функции за процена на трошоците
(Fu, Huang, & Zhang, 2017)	Железнички 4,9km со дијаметар 13,5m	ТБМ со бентонит	Теорија облак (Cloud theory)	Индексен систем со 61 индикатор
(Zhao, Xue, Li, & Zhao, 2017)	80 тунели	ТБМ	Бајесова мрежа	Избор на ТБМ
(Dauwe, Fröhlich, & Weidinger, 2018)	Патен 1,1km под железнички тунел	Минирање (Drill&Blast)	ALARM план со директни мерења во стариот тунел	Геометрија на пругата, шок од експлозија, поместувања
(Liu, Zhao, Zhou, & Tang, 2018)	Метро систем	ТБМ	Истражувачка факторска анализа и модел на структурни равенки	63 ризични фактори
(Sun, Liu, Chu, Chen, & Li, 2018)	Патен 5,8km	НАТМ	Фази Бајесова мрежа	Анализа со податоци од 199 несреќи при изградба од кои 110 се колапс
(Mikaeil, Haghshenas, & Sedaghati, 2019)	Патен 2,7km со профил 75m ²	ТБМ	Фази Ц кластерирање и анализа на видот и ефектите од лом	Нестабилност, поплава, гмечење
(Wang, et al., 2019)	Железнички 3,4km со надслој 567m	НАТМ	АХП и фази теорија за пресметковен модел базиран на интервален број	Доток и продор на вода
(Xing, Zhong, Luo, Li, & Wu, 2019)	Метро 1,7km	ТБМ со штит	Доменска онтологија за формализирање на знаењето на безбедносни ризици при изградба	Штета врз околни конструкции и тонење на тунелот
(Arbabsiar, Farsangi, & Mansouri, 2020)	Водоводен 26km со надслој 1000m	ТБМ со двоен штит	Фази логично моделирање	Геотехнички ризици и стапка на напредување
(Zhou, Fang, & Wu, 2020)	Комунален	Цевковод во рамки на тунелот	Бајесова мрежа и Демпстер-Шаферов теорија на докази	Повеќе ризични сценарија
(He, et al., 2021)	Патен 7,4km со доток на вода од 25000m ³ /d	НАТМ	Фази Бајесова мрежа со помош на експертско знаење	Колапс
(Sharafat, Latif, & Seo, 2021)	Двојни водоводни 10,3km со профил 57m ²	ТБМ	Комбинација од дрво на грешки и настани, позната и како анализа машна (bow-tie)	Деформација и пукање на карпа, слаб напредок на ТБМ, долго поставување на подградба

(Bergmeister, 2022)	Поголем број на железнички тунели во Европа	Повеќе методи	Повеќе различни пристапи	Поголем број на ризици при изградба и експлоатација
(Amadini, et al., 2023)	Железнички 2x14km	ТБМ со двоен штит	Повратна невронска мрежа (Recurrent Neural Network-RNN)	Параметри на ТБМ
(Givi, Akbarpour, Hashemi, Jahromi, & Mousazadeh, 2023)	Метро 7,1km и 10km	НАТМ и ТБМ	АТОМ (Active Threat and Opportunity Management)	94 анализирани ризици
(Guo, Amin, Wang, & Yan, 2023)	Метро станица	Отворен ископ	Метод на истраги, N-K и SD (system dynamics) модели	Човечко-еколошки ризици врз изградбата
(Han, et al., 2023)	Железнички плиток 4,1km со профил од 167m ²	Минирање	Game theory cloud model	Индекс на безбедносен ризик
(Antiga, Chiorboli, & Dotti, 2024)	10km	ТБМ со двоен штит	Монте Карло симулација	Трошоци и време
(Koothongsumrit & Meethom, 2024)	Метро 14,3km	ТБМ	Метод најдобро-најлошо со анализа на опфатот на податоците	Поголем број на ризици поврзани со изградба со ТБМ
(Li, et al., 2024)	Водоводни 0,9km вкупно	НАТМ	Mood factors (индекси при различни состојби)	Очекуван период на изградба и веројатност за комплетирање
(Wang, Jiang, & Li, 2024)	Метро 10,5km со дијаметар од 6m	ТБМ	Питагорини фази сетови и Бајесови мрежи	12 ризични фактори
(Chang, Nordin, Gu, & Zhao, 2025)	Повеќе метро тунели	ТБМ со штит	Комбинација на IVTSFS (Interval-Valued T-Spherical Fuzzy Set), CPT (Cumulative Prospect Theory) и EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution)	Процена на ризици врз постоечките објекти
(Duan, Chu, Bu, Li, & Long, 2025)	5 тунелски секции во карстни зони	НАТМ	Напреден тежински модел на облак	Доток на вода и кал
(Karunaratne & Kim, 2025)	Различни тунели	НАТМ	Мулти-параметарски модел за процена на висок ризик	Повеќе видови на ризици при изградба
(Kwon, Kang, Shin, Ahn, & Choi, 2025)	2,9km под река	ТБМ со бентонит	Теорија на фази множества за распределба на нивоата на доверба на проценките на експертите низ повеќе класи	Колапс, слегнувања на површината, доток на кал и вода, проблеми со ТБМ
(Hafner, Žibert, & Zorin, 2025)	Патен 0,6km	Изграден	TuRisMo и кластерирање	Пожар
(Huang, et al., 2025)	13 патни тунели	Минирање (Drill&Blast)	ЛСТМ (Long Short-Term Memory) повратна невронска мрежа и Бајесов алгоритам за оптимизација	Доток на вода

(Sanchez & Bulla, 2025)	Канализационен 7,8km	ТБМ	Game theory model	Трошоци и време
(Ji, et al., 2025)	Патен	Минирање (Drill&Blast)	Нелинарна ФАХП и комбинирани тежински коэффициенти	Ризици од геологија, градилиште, опрема и минирање
(Zhu, et al., 2025)	Водоводен 9,4km со надслој 300m	ТБМ (ЕПБ и со штит)	Метод со дискретни елементи (ДЕМ) и симплифициран АХП	Нестабилност на челото на ископот

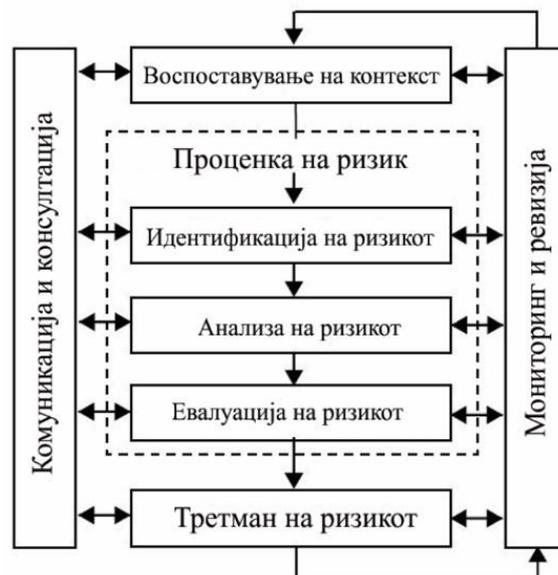
Од истражувањата низ светот и кај нас, може да се забележи дека постоечките методи и модели најчесто не земаат во предвид комбинации на стандардни проектни податоци при анализа и не овозможуваат систематско моделирање на условните врски помеѓу геометриските, геолошките, конструктивните и технолошките параметри. Дел од нив се карактеризираат со субјективност, бидејќи во голема мера зависат од индивидуалното искуство, што може да доведе до неконзистентни резултати. Нивната статичност претставува уште едно ограничување, бидејќи еднаш дефинираната процена на ризикот, ретко се ажурира во согласност со новите информации во текот на проектот. Како резултат на тоа, овие методи имаат ограничена адаптивност и не можат навремено да одговорат на промените на параметрите. Покрај тоа, не секогаш се прават комбинации на сценарија со цел да одреди како промената на ризикот влијае на параметрите, односно најчесто се анализира само влијанието на параметрите врз ризикот.

Во тој контекст, предложениот пристап кој комбинира повеќе модели, претставува клучен чекор кон пообјективна, динамична и адаптивна процена на ризици. Овој пристап овозможува истовремено моделирање на условни и нелинеарни односи меѓу параметрите, како и одредување на зависности кои претходно не се земале во предвид при класичното инженерско проектирање. Ваков интегриран концепт може да допринесе за континуирано ажурирање на ризичните сценарија врз основа на нови податоци, систематско моделирање на комплексните меѓузависности и намалување на субјективноста преку анализа на реални податоци. На тој начин се создава основа за поефикасно управување со ризиците и унапредување на безбедноста и одржливоста на тунелските проекти.

4. МЕТОДИ И ПРИСТАПИ ЗА УПРАВУВАЊЕ СО РИЗИЦИ

Една од главните цели на инженерското проектирање е обезбедување на сигурна употребливост и перформанси на системот или конструкцијата во рамките на економските ограничувања. Сепак, постигнувањето на оваа цел обично не е едноставна задача, особено кај големи инженерски проекти кои понекогаш не успеваат да ја извршат својата предвидена функција. Од оваа перспектива, ризикот генерално е присутен во сите инженерски области (Wang J. X., 2023). Според институтот за проектен менаџмент, управувањето со ризици кај проектите ги вклучува процесите на планирање на управувањето, идентификација и анализа на ризиците, планирање и имплементација на одговори (мерки) и мониторинг на ризиците на проектот. Целите на управувањето со ризици во проектот се да се зголеми веројатноста и/или влијанието на позитивните ризици и да се намали веројатноста и/или влијанието на негативните ризици, со цел да се оптимизираат шансите за успех на проектот (PMI, 2017). Кодексот на пракса на ИТА насочува дека проекти кои вклучуваат тунелски работи, треба да содржат процена на ризиците како и нивна експлицитна и јасна распределба (ITA-ARTES & IMIA, 2023).

Како што е споменато претходно, управувањето со ризици е комплексен процес кој опфаќа повеќе фази, со чија помош може подобро и полесно да се справиме со несигурностите во проектот (Слика 4.1).



Слика 4.1 Шема на процесот на управување со ризици (ISO3100, 2018)

Процената е најважната компонента во управувањето со ризиците. Без овој елемент, има мала надеж за разбирање и управување со ризикот. Целта на процената е да се идентификуваат и анализираат ризичните извори (хазарди) и да се проценат нивните ризици, така што менаџментот може правилно да се справи со ризиците (Ponov, Lyon, & Hollcroft, 2021). Покрај инженерските познавања и вештини за конкретниот проблем, во процената на ризиците се користат и теории на веројатност и статистика, методи за донесување на одлуки, математички и графички методи и др (Karunarathne & Kim, 2025).

Генерално постојат два пристапи кон процената на ризиците: квалитативен и квантитативен. Целта на овие пристапи е иста, но со различна ефикасност.

Квантитативниот пристап означува нумеричка вредност на ризикот, додека квалитативниот пристап доделува релативна мерка на ризик најчесто дефинирана на скала од низок до висок (Alleman & Quigley, 2024). Во денешно време деталната процена на ризици претставува комбинација од квалитативен и квантитативен пристап.

4.1 Квалитативен пристап за процена на ризици

При почетните проектни фази за идентификација на потенцијалните хазарди кои претставуваат закана за активностите при изведба, најчесто се спроведува елементарна квалитативна анализа на ризиците. Квалитативната процена создава описен или категоријален пристап кон информациите за ризик. Тоа претставува формален, организиран, репродуцибилен и флексибилен метод, заснован на научни принципи и валидни докази, кој овозможува доследни описи на ризиците што лесно се објаснуваат на другите (Yoe, 2019).

Главната цел на оваа анализа е подигнување на свеста на сите учесници, за ризиците инволвирани во процесот на изведба и обезбедување на структурна база за донесување на одлуки во раните проектни фази. Временски, квалитативната анализа треба да биде спроведена додека сеуште се можни поголеми промени во делот на проектирањето. Истата треба да го содржи следното (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004):

- Идентификација на хазарди и последици;
- Класификација на идентифицирани хазарди и последици;
- Идентификација на соодветни заштитни или превентивни мерки.

Квалтитативниот пристап е во форма на листи, индекси, дијаграми, матрици и регистри кои содржат детали за ризиците, класи и соодветни мерки (Moller, Hansson, Holmberg, & Rollenhagen, 2017).

Локација	Хазард	Причини	Последици	Иницијален ризик	Мерки за намалување	Резидуален ризик	Мерки за непредвидени настани
Премин под река	Загуба на притисок со течење на површината	Висок притисок врз челото на ископот; Дефекти при третман на почвата или бетонската плоча	Прекин на ТВМ машината; Прекумерни деформации на ниво на реката (речно дно)	ВИСОК	Бетонска плоча; Исполнување на дупките за инјектирање; Мониторинг систем	НИЗОК	Континуирано присуство на активна бушечка машина и опрема за инјектирање за во случај на аномалии
	Диференцијални слегнувања под Лавов Мост	Дефекти при третман на почвата под темелите; Висок притисок врз челото на ископот	Пукнатини на мостот	ВИСОК	Мониторинг во реално време; Континуирана контрола на ископаните количини и притисокот врз челото; Поставување на челична рамка под мостот	НИЗОК	Реинјектирање под столбовите на мостот
	Потенцијално лепливо однесување на глината	Присуство на пластична глина	Успорување на ТВМ машината; Интервенции во комората	СРЕДЕН	Инјектирање на полимери или вода во комората за ископ; Контрола на вртежите на ТВМ машината	ЗАНИМАТЕЛЕН	Преглед на користените адитиви; Миене на ротирачка глава

Слика 4.2 Пример од реџистар на ризици за премин на тунел под мост во Софија (Semerano, Chiriotti, Mercier, & Della Valle, 2012)

Употребата на регистар на ризици (Слика 4.2) е пропишана во повеќето правилници и прирачници од оваа област. Овие регистри треба да ги покриваат сите можни настани и ситуации, кои претставуваат закана за проектот. За да може да се изработат правилно, потребни се експерти од повеќе различни области со искуство во делот на идентификација на хазардите.

Во процесот на идентификација и класификација, треба да се земат во предвид вообичаените причини за настанување на ризични настани како што се:

- Комплексноста на применетата технологија;
- Неповолните и неочекуваните теренски услови;
- Техничката и раководната неспособност;
- Човечките фактори и грешки;
- Недостаток на доволна комуникација и координација меѓу учесниците;
- Комбинација на повеќе несакани настани, кои индивидуално не изгледаат критични.

Целта на класификацијата е да се обезбеди база, која ќе служи во процесот на донесување на одлуки за примена на мерки за намалување на ризиците. Во класификационите системи се опишуваат веројатноста од настанување на одреден хазард и очекуваните последици. Рејтингот од веројатноста и последиците најчесто се комбинира во индекс на ризик или матрица на ризик (Табела 4.1), со цел да се процени истиот. Матрицата на ризик може да се користи и во квантитативната анализа, кога веројатностите и последиците се проследени со соодветни нумерички вредности.

Табела 4.1 Пример од матрица на ризик (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004)

Веројатност	Последица				
	Катастрофална	Тешка	Сериозна	Значителна	Занемарлива
Многу висока	Неприфатливо	Неприфа.	Неприфа.	Непосак.	Непосак.
Висока	Неприфатливо	Неприфа.	Непосак.	Непосак.	Прифатливо
Средна	Неприфатливо	Непосак.	Непосак.	Прифатливо	Прифатливо
Ниска	Непосакувано	Непосак.	Прифат.	Прифатливо	Занемарливо
Многу ниска	Непосакувано	Прифат.	Прифат.	Занемарливо	Занемарливо

По идентификација на хазардите и ризиците се одредуваат соодветни мерки. Во оваа фаза резултатите примарно влијаат на техничките решенија и евентуално на алтернативни работни процедури. Вака спроведената квалитативна анализа, треба да прикаже дали мерките за справување со ризиците, всушност ќе ги постигнат посакуваните резултати. Во спротивно, потребен е друг пристап, што најчесто е случај кај комплексни конструкции како што се тунелите (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004).

4.2 Квантитативен пристап за процена на ризици

За подетални анализи на ризиците се применува нумерички, односно квантитативен пристап, кој може да биде детерминистички или пробабилистички. Квантитативната процена се потпира на нумерички изрази кои се генерално поинформативни од квалитативните процени. Кога податоците и ресурсите се доволни, се дава предност на квантитативна процена, освен кога прашањата на менаџерот за ризик можат соодветно да се одговорат на наративен или категоричен начин (Yoo, 2019).

Квантитативниот пристап има потреба од детална анализа на причините и последиците и објаснување на зависностите помеѓу разгледуваните настани и феномени. Со ваквата анализа се обезбедуваат вредни информации за донесување одлуки во случај на несигурности и непредвидени настани, како избор на соодветен проект или технологија на градење, можни заштитни мерки, влијанија врз трети лица и животната средина. Исто така, се овозможува детерминирање на цените и времето на градба (Špračková, 2012).

Со оваа анализа може да се процени веројатноста и влијанието на ризиците врз трошоците и распоредот на проектот, и претставува нумеричка или пообјективна анализа на несигурностите врз целиот проект преку употреба на различни техники (Alleman & Quigley, 2024).

Предностите на квантитативните анализи се (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004):

- Подobar опис на ризикот со давање на најверојатни минимални и максимални вредности за секоја последица;
- Примената на статистичка анализа и проценување на опсегот на можни вредности и параметри ја олеснува работата на лицата кои ја вршат процената на ризик;
- Финалната процена на ризикот најчесто претставува дистрибуција на веројатноста, а не единствена вредност.

Квалитативните и квантитативните анализи на ризик не треба да се гледаат како два комплементарни пристапи. Напротив, станува збор за спектар на пристапи каде што варира улогата на квантификацијата и употребата на веројатностите. Квантификацијата понекогаш може да се смета како средство за давање структура за квалитативна анализа на ризик. Обратно, квалитативната анализа на ризик често е претходен чекор пред развојот на квантитативен модел на ризик (Moller, Hansson, Holmberg, & Rollenhagen, 2017).

Пристапот за квантификација на несигурностите, хазардите и ризиците најчесто претставува комбинација од математички и графички модели или методи. Во литературата може да се сретнат и како графички мрежи или како алатки за управување на ризиците.

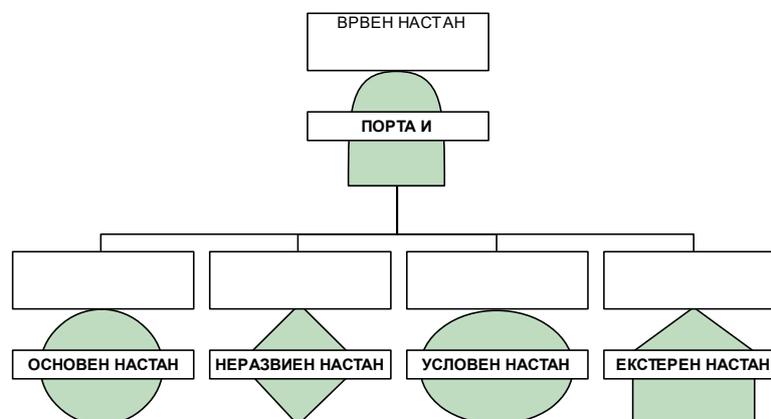
4.2.1 Анализа на дрво на грешки (Fault tree analysis)

Оваа техника, служи за анализа на одреден hazard и различните начини и причини кои го предизвикуваат. Самото дрво на грешки претставува графички модел кој прикажува комбинација на настани или несигурности кои влијаат (претходат) на потенцијалниот hazard. Природата на ваквиот графички модел е квалитативна, но поради неговата особена подобност за квантифицирање, најчесто се користи во комбинација со пробабилистички модели. Во терминологијата на оваа анализа, главниот hazard (лом на системот) се нарекува врвен настан (top event), а сите причини кои придонесуваат за настанување на врвниот настан се примарни или влезни настани (primary/input events). Поврзувањето, односно врските помеѓу настаните се прават преку посебни елементи наречени „порти“ или излези (gates). Пристапот на овој метод е дедуктивен, што значи дека се разгледува од нешто генерално кон нешто специфично, односно процесот на формирање на дрвото започнува од врвниот настан (hazard) и продолжува кон примарните настани (IEC/ISO31010, 2009; Smith D. J., 2017; Wang J. X., 2023; Yoe, 2019).

а) Настани (Events)

Постојат повеќе видови на настани (Слика 4.3), а тоа се:

- Врвен (посреден) настан (top/intermediate event) – настан кој настанува поради една или повеќе причини (несигурности, настани, ситуации);
- Основен (базичен) настан (basic event) – иницијален настан кој не бара понатамошен развој и за кој се достапни податоци;
- Неразвиен настан (undeveloped event) – настан кој не се развива понатаму поради недостатокот на информации или неговата мала последица;
- Условен настан (conditional event) – претстаува специфични услови или ограничување поврзани со соодветната порта (излез);
- Екстерен настан (external/house event) – настан кој дефинитивно ќе се случи или не (латентен).

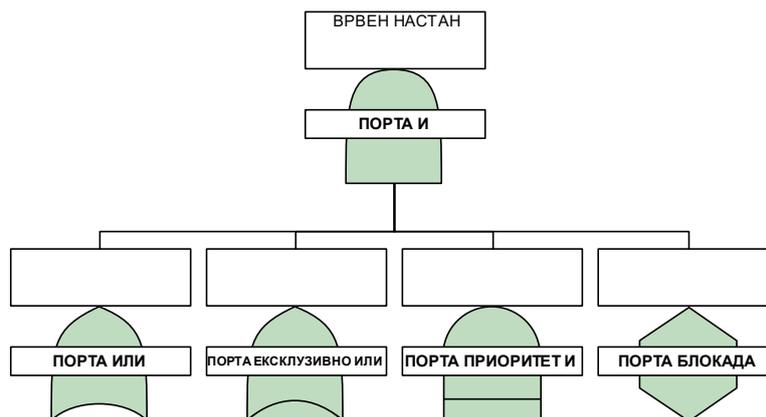


Слика 4.3 Символи кои најчесто се користени за настани во дрвото на грешки

б) Порти (Gates)

Портите/излезите се логични можности кои вклучуваат еден или повеќе настани и може да бидат (Слика 4.4):

- Порта И (AND gate) – прикажува дека излезниот, односно следниот настан во хиерархијата на дрвото се случува, ако сите примарни (влезни) настани се случат (појават) истовремено;
- Порта ИЛИ (OR gate) – излезниот настан се случува доколку се случат еден или повеќе влезни настани.
- Порта ЕКСЛУЗИВНО ИЛИ (EXCLUSIVE OR gate) – излезниот настан се случува, ако се случи само еден влезен настан (не повеќе);
- Порта ПРИОРИТЕТ И (PRIORITY AND gate) – излезниот настан се случува, ако сите влезни настани се случат во одредена секвенца (пр. од лево кон десно);
- Порта БЛОКАДА (INHIBIT gate) – излезниот настан се случува, ако еден влезен настан се случи при услови на овозможување (претставени од условен настан).



Слика 4.4 Символи кои најчесто се користени за порти во дрвото на грешки

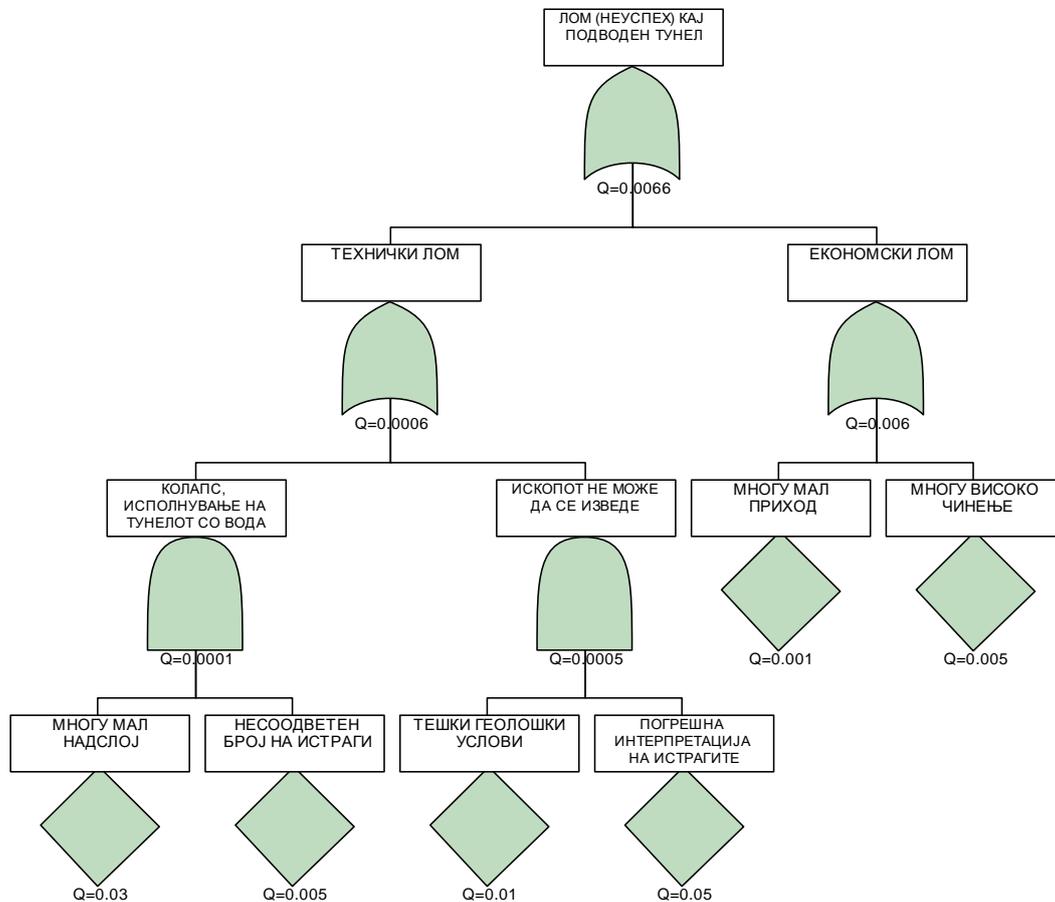
При анализи во делот на градежништвото најмногу користени се портите И & ИЛИ, кои најчесто ги опишуваат проблемите со кои се справуваат инженерите. Базирано на правилата на пробабилистичката теорија, равенките за веројатност на овие порти се следните:

$$P = \prod_{i=1}^n p_i \quad \text{за порта И} \quad (4.1)$$

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad \text{за порта ИЛИ} \quad (4.2)$$

Во равенките, n го означува бројот на влезни настани кон соодветната порта, а p_i се веројатностите за појава или лом (неуспех) на влезните настани.

Според примерот на (Слика 4.5), прикажано е дека ломот на еден подводен тунел зависи од два главни параметри, односно технички или економски лом дадени во вид на порти ИЛИ. Секоја од овие порти натаму е соодветно разложена се до примарните, или во овој случај, неразвиени настани.



Слика 4.5 Пример од анализа на грво на грешки за подводен тунел (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004)

Со задавање на веројатности за секој од овие неразвиени настани, пресметана е вкупната веројатност за појава на лом (хазард) во овој тунел (4.7). Пресметката извршена е според погоре зададените равенки (4.1 и 4.2) со што се добива следното:

$$P_{\text{колапс}} = 0,03 * 0,005 = 0,00015 \quad (4.3)$$

$$P_{\text{ископ}} = 0,01 * 0,05 = 0,0005 \quad (4.4)$$

$$P_{\text{технички лом}} = 1 - [(1 - 0,00015) * (1 - 0,0005)] = 0,00065 \quad (4.5)$$

$$P_{\text{економски лом}} = 1 - [(1 - 0,001) * (1 - 0,005)] = 0,0060 \quad (4.6)$$

$$P_{\text{лом кај подводен тунел}} = 1 - [(1 - 0,00065) * (1 - 0,0060)] = 0,0066 \quad (4.7)$$

Сличен ваков пристап може да се користи за анализа на секаков вид на несигурности и хазарди во градежништвото како и во други области и дејности.

4.2.2 Анализа на дрво на настани (Event tree analysis)

Описот на развивање од првичен настан преку можни секвенци до дефинирана финална состојба може да се спроведе преку анализа на дрвото на настани. Како и дрвото на грешки, овој модел е графички, но природата на пристапот е индуктивна. Со оваа техника се идентификуваат и анализираат можни сценарија кои следат после одреден иницијален настан (хазард). Дрвото на настани овозможува преку логичен и прегледен редослед, да се определат последиците кои може да се јават во проектот (Wang J. X., 2023).

Во оваа анализа се започнува со врвниот настан (хазард), а потоа се дефинираат сите можни состојби кои резултираат со последици. Моделот се состои од гранки и јазли кои ги опишуваат различните исходи на иницијалниот хазард. Кај секоја гранка (branch) има две можности, односно настанот да се случи или не. Пробабилистичката позадина на ваквиот избор се интерпретира со веројатност на појава или успешност на настанот (p_i) и обратен случај ($1 - p_i$) што всушност ја претставува веројатноста за неуспех. Најчесто во анализата, гранките го означуваат успехот или неуспехот на некоја превентивна, заштитна или мерка за намалување на ефектите од хазардот (IEC/ISO31010, 2009; Meyer & Reniers, 2022; Љое, 2019). Веројатноста на секоја последица е производ од сите индивидуални веројатности и фреквенцијата на иницијалниот настан (Слика 4.6).



Слика 4.6 Пример од дрво на настани при појава на нестабилност на челото на ископот кај железнички тунел

Анализата на дрвото на настани може да се користи во било која фаза или работен век на еден проект. За формирање на моделот потребно е (IEC/ISO31010, 2009; Љое, 2019):

- Експлицитно познавање на процесот кој се моделира;
- Соодветен иницијален настан/настани (хазарди);
- Секвенци на последователни настани;
- Исходот или крајните можности треба да бидат познати;
- Доволно податоци за да може нумерички да се опише моделот (веројатности).

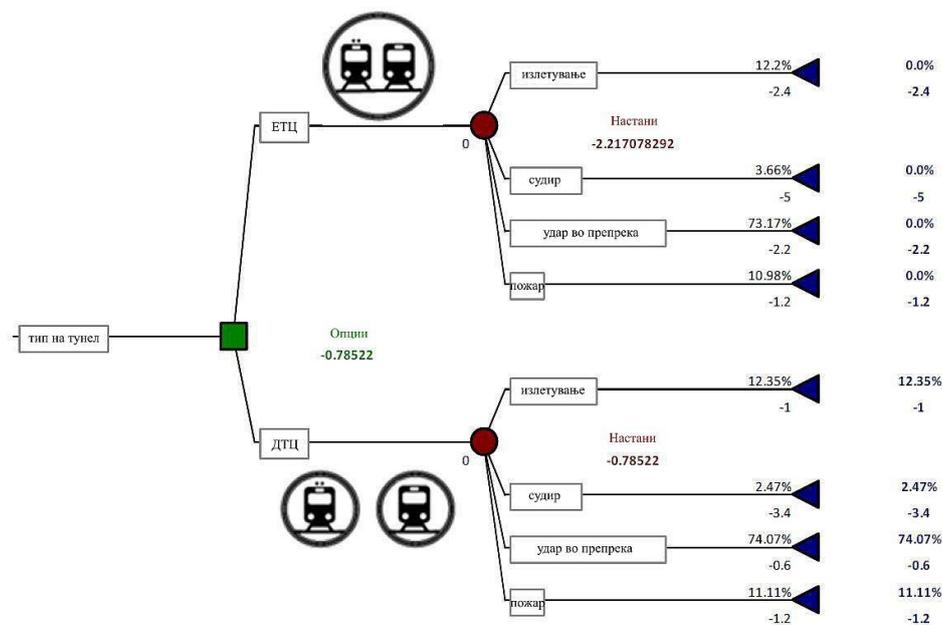
4.2.3 Анализа на дрво на одлуки (Decision tree analysis)

Со дрвото на одлуки се анализира најдобрата одлука базирана на достапните информации. Оваа анализа е слична на дрвото на настани, при што иницијалниот настан всушност претставува одлука (IEC/ISO31010, 2009).

Моделот ги претставува различните компоненти во проблематиката на одлучување, во вид на гранки и јазли. Постојат три типа на јазли (Слика 4.7):

- Квадратен јазол – означува различна одлука или дејство;
- Кружен јазол – означува настан во дрвото, каде постои одреден степен на несигурност;
- Триаголен јазол – ја означува корисноста на одреден правец (пат) од дрвото.

Многу од одлуките кај подземните конструкции содржат голема несигурност, а со оваа анализа истите можат да се претстават во структурен формат. Ова понатаму може да претставува подобра основа за одлучување.



Слика 4.7 Пример од анализа на дрво на одлуки за избор на тип на железнички тунел (ЕТЦ – една тунелска цевка; ДТЦ – две тунелски цевки) (Vanorio & Mera, 2012)

4.2.4 Анализа машна-пеперутка (Bow tie analysis)

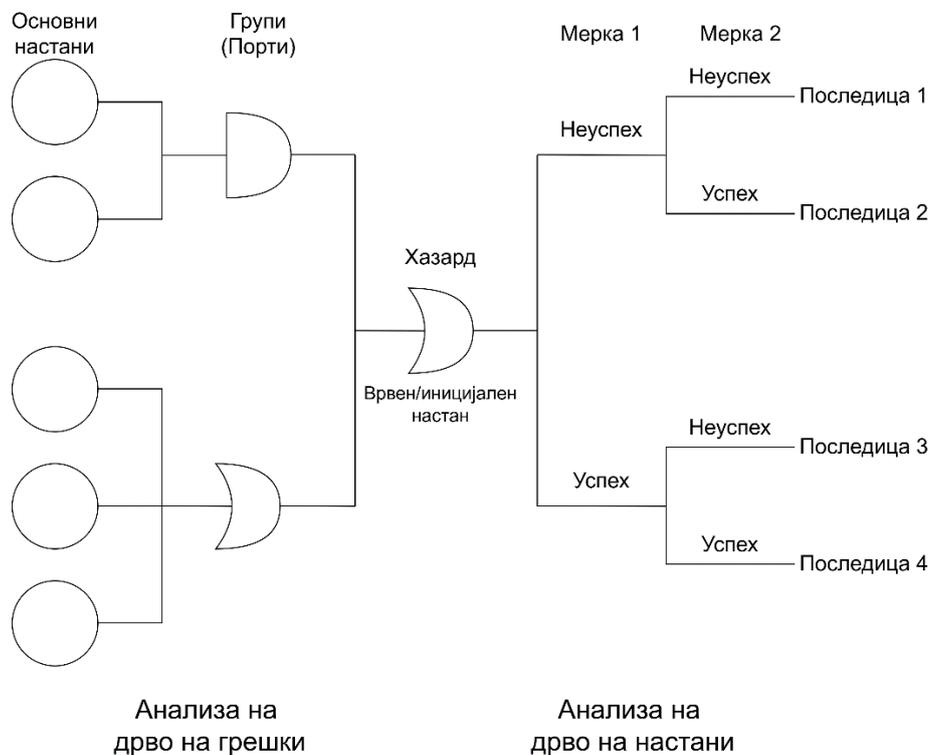
Методот машна-пеперутка претставува комбинација на две анализи на дрва (најчесто дрва на грешки и настани) и се користи за да обезбеди јасна мапа на ризиците и нивната контрола. Името на оваа анализа (машна-bow tie) произлегува од обликот на дијаграмот кој се креира. Визуелно се добива целосен преглед на сценариото за hazard и врските помеѓу опасностите и причините, пречките за да се спречи појавата и контролите за ублажување за да се намали влијанието доколку се случи настан (Popov, Lyon, & Hollcroft, 2021).

Ваквиот пристап, применет е за процена на hazardите и ризиците кај различни тунели во прелиминарна анализа (Глава 6). Принципот на оваа анализа започнува со формирање на дрвото на грешки, каде што одреден hazard во тунелот, кој е дефиниран на база на расположливите податоци, се претставува како врвен настан. Разгранувањето на дрвото се прави по логичен редослед каде што примарните настани се групирани во неколку главни групи. За секој основен настан доделени се веројатности кои ја опишуваат несигурноста на појава или влијанието врз врвниот настан (Табела 4.2).

Табела 4.2 Однос помеѓу веројатноста на појава и степеној на влијание врз појава на hazard (Stille, 2017) со одредено надолгнување)

Класа	Опис на веројатност на појава	Интервал			Степен на влијание врз појава на hazard
		< 0,01	< 1 %	< 1/100	
1	Многу мала веројатност	< 0,01	< 1 %	< 1/100	Многу низок
2	Мала веројатност	0,01 - 0,05	1 - 5 %	1/100 - 1/20	Низок
3	Средна веројатност	0,05 - 0,2	5 - 20 %	1/20 - 1/5	Среден
4	Голема веројатност	0,2 - 0,5	20 - 50 %	1/5 - 1/2	Висок
5	Многу голема веројатност	> 0,5	> 50 %	> 1/2	Многу висок

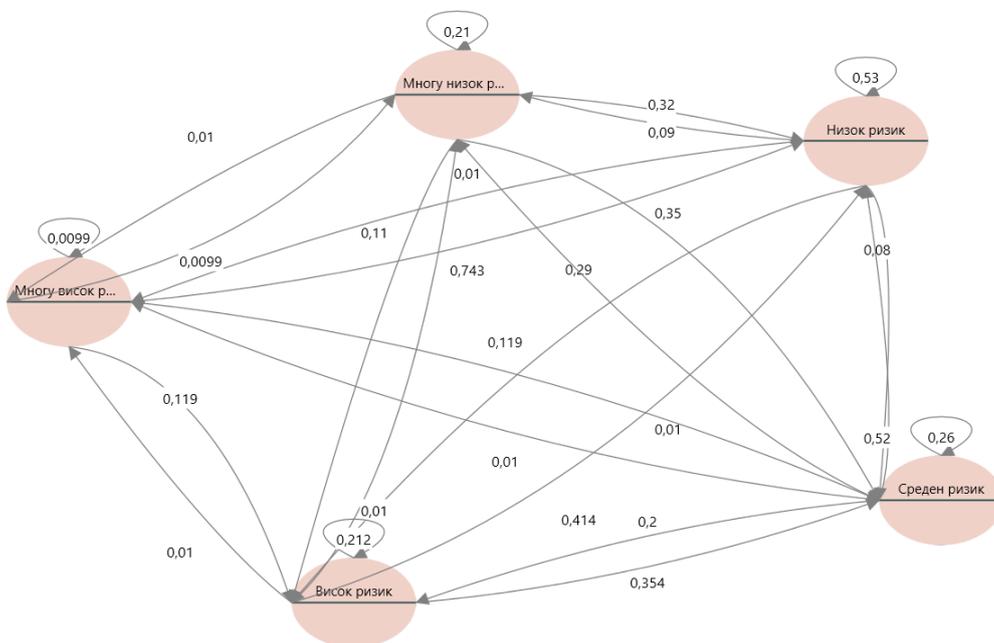
Ова ја дава веројатноста на појава на hazardот (врвниот настан) во временскиот период за изградба на тунелот. Врвниот настан од дрвото на грешки со неговата веројатност, претставен е како иницијален настан во дрвото на настани. Во дрвото на настани, јазлите ги означуваат усвоените и предложените мерки кои влијаат при појавата на hazardот, односно нивниот успех или неуспех ги детерминира последиците (Слика 4.8). Дополнително, со пробалистичка анализа во која се доделуваат стандардни девијации, може да се добијат резултати во форма на кумулативна распределба на веројатноста.



Слика 4.8 Принцип на комбинација на дрво на грешки и дрво на настани (анализа машина)

4.2.5 Маркова анализа (Markov analysis)

Марковата анализа се користи кога идната состојба на системот (конструкцијата) зависи само од неговата сегашна состојба. Најчесто се користи за анализа на системи што можат да постојат во повеќе состојби. Марковиот процес со дискретни променливи се нарекува Марков синџир (ланец). Овој синџир обично е дефиниран за дискретни чекори од времето или просторот, односно променливи кои се менуваат од еден до друг чекор. Марковиот процес наоѓа примена во многу инженерски апликации како моделирање при влошување на состојбата, планирање на одржување, детекција и прогноза на грешки, моделирање на геотехнички услови и друго. Оваа анализа користи дијаграм за транзиција на состојбите на еден систем (Слика 4.9). Самиот процес може да се употреби за процена на веројатноста за промена на состојбата на одреден систем или конструкција (IEC/ISO31010, 2009; Smith D. J., 2017; Yoe, 2019).

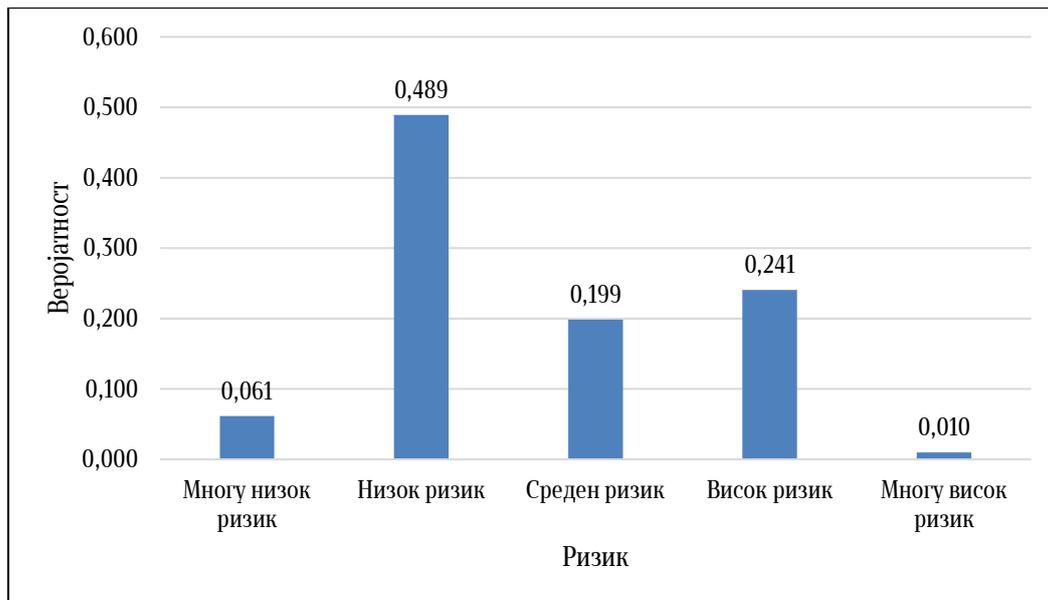


Слика 4.9 Пример од Марков дијаграм за промена на состојби на ризик кај тунелски проекти

При анализа на ризици кај тунелите, Марковиот процес може да се користи за процена на веројатности на различни ризични состојби во форма на Маркова матрица (Табела 4.3). Покрај тоа може да се предвиди веројатноста на состојби на подолг период (стабилна состојба) (Слика 4.10).

Табела 4.3 Маркова матрица за веројатности на транзиција на состојби на ризик кај тунели

Ризик	Многу низок	Низок	Среден	Висок	Многу висок
Многу низок	0,21	0,32	0,35	0,11	0,01
Низок	0,09	0,53	0,08	0,29	0,01
Среден	0,01	0,52	0,26	0,20	0,01
Висок	0,01	0,41	0,35	0,21	0,01
Многу висок	0,01	0,75	0,12	0,12	0,01



Слика 4.10 Пример за предвидување на состојба на ризик кај тунелски проекти на долг период (стабилна состојба) според Марков процес

4.2.6 Анализа на видот и ефектите од лом (Failure mode and effects analysis)

Анализата на видот и ефектите од лом (FMEA), овозможува да се процени релативното влијание на различни видови на лом (неуспех, hazard), со цел да се идентификуваат деловите од еден процес (систем, конструкција) на кои што треба да се посвети најголемо внимание (или на кои најмногу им треба промена). Овој процес развиен од страна на армијата на САД, треба да даде одговор на две прашања „што лошо може да се случи?“ и „како тоа може да се случи?“. Методот се среќава и под името „Failure mode, effects and criticality analysis“ (FMECA) каде што дополнително се прави и анализа на критичноста. Во градежништвото, овие техники може да се применат во фаза на проектирање, изградба, експлоатација и одржување кај различни видови на објекти. За користење на оваа анализа потребно е да се има добро дефиниран систем и детални информации и податоци за компонентите во системот (Meyer & Reniers, 2022; Popov, Lyon, & Hollcroft, 2021; Wang J. X., 2023). Типичните чекори на овој процес, се следните:

- Преглед на потенцијалните видови на лом;
- Листа на потенцијалните ефекти од лом;
- Доделување на рејтинзи според очекуваниот интензитет, веројатноста на појава и можноста за детекција;
- Пресметување на бројот на приоритет на ризик (БПР);
- Процена на ризиците;
- Усвојување на соодветни мерки;
- Повторна пресметка на бројот на приоритет на ризик.

Секој вид на лом (хазард) во овој метод се рангира според три параметри: очекуван интензитет (severity), веројатност на појава (occurrence) и можност за детекција (detection). Секој рејтинг претставува нумеричка оцена која се доделува на параметарот, а потоа производот од сите три оцени го даваат бројот на приоритет на ризик (risk priority number – RPN). Елементите со повисок број на приоритет на ризик се покритични во однос на оние со помали вредности (IEC/ISO31010, 2009; Yoe, 2019). Бројот на рејтинзи, оцените и интерпретацијата на бројот на приоритет на ризик може да се сретнат во различни варијанти во литературата (Amini & Fazelinia, 2017; Ghasemi, Ardeshir, & Amiri, 2012). Во ова истражување, предложени се рејтинзи на скала од 1 до 5 кои може да се применат при анализа кај тунелите.

а) Очекуван интензитет (И)

Очекуваниот интензитет всушност ги претставува потенцијалните ефекти, предизвикани од страна на видот на лом. Ефектите се всушност последиците кои ги предизвикува некој хазард и истите може да се однесуваат на луѓето, економските и временските загуби. Концептот кој овде е формиран, ги зема во предвид само економските и временските влијанија врз проектите (Табела 4.4).

Табела 4.4 Рејтинзи за интензитетите на ефектите во анализата на видот и последиците од лом

Рејтинг (И)	Ефект (последица)	Интензитет на ефектот
1	Мал	< 0,1 % влијание врз трошоците и времето на проектот
2	Низок	0,1-1 % влијание врз трошоците и времето на проектот
3	Среден	1-10 % влијание врз трошоците и времето на проектот
4	Голем	10-80 % влијание врз трошоците и времето на проектот
5	Екстрем	> 80 % влијание врз трошоците и времето на проектот

б) Веројатност на појава (П)

Овој параметар ја претставува веројатноста (можноста) за одреден лом навистина да се случи. Веројатностите на појава кои се доделени, се базираат на сопствени истражувања и препораки од страна на експерти во оваа област. Бидејќи постои одреден степен на несигурност и потешкотии при разликување и избор на многу ниски вредности, најниската веројатност на појава изнесува 0,002 (Табела 4.5).

Табела 4.5 Рејтинзи за веројатноста на појава во анализата на видот и последиците од лом

Рејтинг (П)	Веројатност на појава	Можна стапка на лом		
1	Многу мала	< 1/500	< 0,002	< 0,2 %
2	Мала	1/500 - 1/100	0,002 - 0,01	0,2 - 1 %
3	Средна	1/100 - 1/10	0,01 - 0,1	1 - 10 %
4	Голема	1/10 - 1/2	0,1 - 0,5	10 - 50 %
5	Многу	> 1/2	> 0,5	> 50 %

в) Можност за детекција (Д)

Детекцијата ја претставува можноста (шансата) за откривање на потенцијалната причина или механизмот за лом. Овој параметар претставува процена на способноста да се

идентификува потенцијална слабост пред истата да се појави. Овој параметар е проследен со квалитативен опис на рејтинзите (Табела 4.6).

Табела 4.6 Рејтинзи за детекција на потенцијалните хазарди во анализата на видот и последиците од лом

Рејтинг (Д)	Можност за детекција (откривање)	Критериум
1	Многу висока	Многу висока шанса за откривање на потенцијалната причина/механизам за лом
2	Висока	Висока шанса за откривање на потенцијалната причина/механизам за лом
3	Средна	Средна шанса за откривање на потенцијалната причина/механизам за лом
4	Ниска	Ниска шанса за откривање на потенцијалната причина/механизам за лом
5	Многу ниска	Многу ниска шанса за откривање на потенцијалната причината/механизмот за лом

г) Број на приоритет на ризик (БПР)

Со множење на рејтинзите од сите три параметри се добива бројот на приоритет на ризик за секој хазард (лом) посебно. Вредноста на БПР е во граници од 1 до 125.

Покрај споредбата (рангирање) на БПР, со која се анализираат најкритичните хазарди, често се прави и квалитативна процена на ризикот на база за добиените вредности. Односот помеѓу усвоените граници на БПР и процената на големината на ризикот, даден е во следната табела (Табела 4.7).

Табела 4.7 Процена на ризиците во однос на бројот на приоритет на ризик (БПР)

Процена на ризик	вредност на БПР
„Низок“ <	16
„Среден“ =	16-36
„Висок“ >	36

Предноста на анализата на видот и ефектите од лом е во нејзината едноставност за користење и можност за модифицирање, при што може да се добијат задоволителни резултати и без користење на специјализирани софтвери.

Табела 4.8 Пример од анализа на видот и ефектите од лом кај тунел во изградба

Хазард	Очекуван интензитет (И)	Веројатност на појава (П)	Можност за детекција (Д)	Број на приоритет на ризик	Процена на ризик
Прекумерни деформации	3	2	2	12	Низок
Поплавување	3	2	3	18	Среден
Колапс	4	3	4	48	Висок
Оштетување на конструкции на површината	4	2	4	32	Среден
Пожар	3	2	1	6	Низок

4.2.7 Статистички методи

Статистиката е наука за собирање и организирање податоци и донесување одлуки од бази и множества на податоци. Статистичките методи се основните (класични) методи за анализа на податоци и главно се концентрираат на тестирање на однапред одредени претпоставки и модели на прилагодување на податоците (Binu & Rajakumar, 2021; Kantardzic, 2020). Овие методи и техники наоѓаат примена во многу области, а при процена на ризици кај тунелите, најчесто се комбинираат со други методи:

- Процена на разлики во податочни множества (општа статистика) се користи за да се одредат генералните карактеристики на податоците. Вообичаено се користат средна вредност, медијана, мода, варијанса и стандардна девијација;
- Регресија е предвидување на континуирани променливи со цел да се добие најдобар модел кој ги поврзува влезните и излезните променливи. Постојат различни видови: линеарна (со праволиниска врска меѓу променливите), нелинеарна (со врска меѓу променливите која не е праволиниска), логистичка (кога целната променлива е зависна променлива), регуларизирана (кога има многу влезни променливи), Бајесова (користи дистрибуција на веројатноста) и други. Во денешно време регресијата се користи и како едноставен алгоритам за предвидувања во машинското учење;
- Корелациона анализа има за цел да ја измери јачината и насоката на врската помеѓу променливи. Пирсоновата анализа се користи за линеарна зависност, а Спирмановата за рангирани или нелинеарни односи;
- Анализа на главни компоненти (Principal Component Analysis – PCA) е техника која се користи за намалување на димензионалноста на податоците – односно да се намали бројот на променливи, но да се задржи најголемиот дел од информацијата.

4.2.8 Фази множества и фази логика

Историски гледано, често се стремиме кон прецизен и јасен опис на работите или настаните. Оваа прецизност се постигнува преку изразување на појавите во нумерички или категоријални вредности. Но, во многу реални ситуации, нема целосно прецизни вредности, односно постои одреден степен на несигурност (нејасност). Поларитетот помеѓу несигурноста и прецизноста претставува забележителна контрадикција во развојот на современите системи за обработка на информации. Едно ефикасно средство за надминување на оваа контрадикција е теоријата на фази множества (fuzzy set theory), која претставува мост помеѓу високата прецизност и високата комплексност на несигурноста (нејасноста). Фази логиката овозможува справување со несигурноста на интуитивен и природен начин. Покрај тоа што овозможува формализирање на непрецизни податоци, таа овозможува и извршување аритметички и Булови (Boolean) операции користејќи фази множества (Kantardzic, 2020).

Во фази логиката се користат континуирани вредности и претходно дефинирани правила „Ако-Тогаш“ („If-Then“) за подборо да се објаснат несигурностите. При анализа на ризици, фази логиката се употребува најчесто во комбинација со други методи и пристапи.

4.2.9 Други пристапи

Покрај наведените, постојат и други модели, алатки, пристапи и методи кои може да се применат за „класична“ процена на ризиците:

- Анализа на причини и ефекти (Cause and effect analysis);
- Анализа на причини и последици (Cause-consequence analysis);
- Анализа на трошоците и добивките (Cost-benefit analysis);
- Анализа на сценарија (Scenario analysis);
- Техники Делфи (Delphi Techniques);
- Карти на докази (Evidence Maps);
- Генерични процеси (Generic Process);
- Бернулиев процес (Bernoulli process);
- Поасонов процес (Poisson process);
- Прелиминарна анализа на хазарди (Preliminary Hazard Analysis);
- Анализа на хазарди и критични контролни точки (Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP));
- Студија за хазарди и оперативност (Hazard Operability Study (HAZOP));
- Процесот Монте Карло (Monte Carlo Process);
- Мултикритериумски анализи (Multicriteria Decision Analysis);
- Аналитички хиерархиски процес (Analytical Hierarchy Process) и др.

Од страна на повеќе агенции и служби, развиени се методи кои главно се користат за процена на ризици кај патни тунели во фаза на експлоатација како: модел за квантитативна анализа на ризици за транспорт на опасни материи низ патни тунели (QRAM), Австриски модел за ризици кај тунелите (TuRisMo), Холандска анализа на сценарија за патни тунели, Холандски TUNPRIM модел, Германска анализа на ризици за патни тунели, Италијански метод за анализа на ризици (IRAM), Чешка анализа на ризици за патни тунели и други. Кај овие модели генерално се анализираат ризици од колизија на возила (судар), пожари и истекување на опасни материи. Како влијателни фактори се користат: типот на сообраќај (еднонасочен или двонасочен), должината на тунелот, брзината на движење, ПГДС (просечен годишен дневен сообраќај), процентуалното учество на тешки товарни возила и автобуси и типот на вентилација во тунелот.

Во денешно време и БИМ моделите (Building Information Modelling) често се имплементирани заедно со управувањето со ризици. Комбинацијата на БИМ и ризиците наоѓа голема примена кај урбаните тунелски проекти (Providakis, 2021).

4.3 Пристапи за процена на ризици со примена на машинско учење

Управувањето со ризици е процес кој постојано се развива. Затоа, од важност е да се следат и усвојуваат промените што ги носат структурните прекини во процесот на управување со ризици. Усогласувањето со промените подразбира редефинирање на компонентите и алатките со цел да се биде во чекор со напредокот на технологијата (Karasan, 2022). Оваа област се поврзува со решавање на проблеми со помош на компјутери и алгоритми, преку анализирање на податоци. При овој процес се откриваат шеми кои можат да бидат корисни. Машинското учење претставува еден континуитет на методите што се занимаваат со анализа на податоци (Witten, Frank, Hall, & Pal, 2017). Машинското учење, како комбинација од вештачка интелигенција и статистика, се покажало како плодна област на истражување, создавајќи голем број различни проблеми и алгоритми за нивно решавање. Овие алгоритми се разликуваат во своите цели, во достапните множества податоци за обука и во стратегиите за учење и претставувањето на податоците. Сепак, сите овие алгоритми учат со пребарување низ n -димензионален простор на дадено множество податоци, за да пронајдат прифатлива генерализација. Една од најфундаменталните задачи за машинско учење е индуктивното машинско учење, каде што генерализацијата се добива од множество примероци и таа се формализира со користење на различни техники и модели (Kantardzic, 2020). Како што може да се забележи во истражувањата во Глава 3, кај тунелските проекти има голема примена на техники на машинско учење и вештачка интелигенција.

4.3.1 Кластеризација

Кластеризацијата или кластер анализата се смета за постапка за групирање на слични ентитети на заеднички начин. Организирањето на податоците во смислени комбинации претставува суштински начин за стекнување знаење преку учење. Колективното групирање на слични ентитети помага да се определат атрибутите на различните групи. Дополнително, кластеризацијата овозможува увид во разбирањето на различни обрасци кај различни групи. Оваа техника се користи и за намалување на димензионалноста на податоците при работа со голем број променливи (Binu & Rajakumar, 2021).

Кластеризацијата генерално се дели на (Aggarwal & Reddy, 2014; Binu & Rajakumar, 2021; Witten, Frank, Hall, & Pal, 2017):

- Партициска, каде што податоците се делат на фиксен број на кластери (претходно дефиниран број K) и секој објект (дел од податоците) се доделува точно на еден кластер. Алгоритми: K-Means, Fuzzy C-Means, Spectral Clustering;
- Хиерархиска, каде што се генерира хиерархија на кластери, имено, дендрограм кој прикажува како кластерите се поврзани едни со други. Понатаму продолжува со итеративно спојување на мали кластери во еден голем или со подлеба на големите кластери, односно агломеративна или разделувачка кластеризација. Алгоритми: Single and Complete Linkage, Ward's Method, BIRCH (Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies);
- Густинска, каде кластерите се региони со висока густина, раздвоени во области со мала густина. Алгоритми: DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) и OPTICS (Ordering Points To Identify the Clustering Structure);

- Мешавинска или модел-базирана, во која се претпоставува дека податоците се генерирани со мешавина од основни распределби на веројатност, со што и секој кластер може да биде претставен како дистрибуција на веројатноста. Алгоритми: GMM (Gaussian Mixture Model) и EM (Expectation–Maximization).

Кај тунелите, кластеризацијата може да се користи при дефинирање на параметри и услови (геологија, подградба, метод на изградба), оптимизација, следење на изведба и трошоци како и анализа на ризици. Во (Табела 4.9) прикажана е кластеризација при процена на течење на вода во метро тунел, каде се користени фактори (f_i) во однос на подградбата (споеви, пукнатини и состојба на влошување), квалитет на инјектирање и околните теренски услови (влажност, слегнувања). Самите кластери содржат повеќе делови од доказите (факторите), со што се зголемува довербата при класификација на ризикот.

Табела 4.9 Пример од употреба на кластеризација за процена на течење на вода во метро тунел (Zhang, Wang, & Wu, 2021)

Ризичен кластер	Број на фактори во кластер	Споена/комбинирана распределба на веројатности					
		f_{i1}	f_{i2}	f_{i3}	f_{i4}	f_{i5}	$f_{i\Omega}$
I	2	0,931	0,006	0,000	0,006	0,000	0,057
II	3	0,000	0,989	0,000	0,000	0,000	0,011
III	2	0,000	0,982	0,000	0,000	0,000	0,018
IV	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ω	8	0,395	0,437	0,000	0,000	0,000	0,167

* I-V (класи од низок кон висок ризик), Ω е несигурна класа

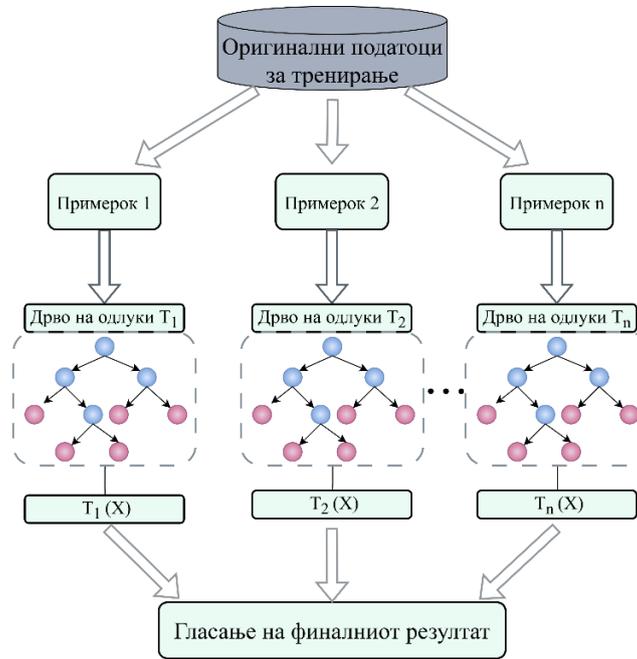
4.3.2 Алгоритми за учење и предвидување на податоци

Со развојот на вештачката интелигенција, односно машинското учење и т.н. рударење на податоци (data mining) доаѓа до појава и примена на различни алгоритми и пристапи кои се користат во скоро сите области каде што има поголем број на податоци. Целта на примената на овие алгоритми е да се учи и предвидува од податоците и да се откријат одредени шеми, трендови и зависности. Постојат различни поделби на алгоритмите и нивни категоризации во однос на тоа како функционираат и за што се користат (Kantardzic, 2020; Karasan, 2022; Khodabakhshian, 2023; Witten, Frank, Hall, & Pal, 2017). Тука ќе бидат кратко објаснети моментално најпопуларните алгоритми, кои наоѓаат примена и во областа на ризиците кај тунелите (Shan, He, Xu, Armaghani, & Sheng, 2023), а набројани се и останатите кои се актуелни.

а) Алгоритам на случајни дрва (Random forest)

Овој алгоритам е составен од повеќе дрва на одлуки (шума на одлуки), кои се создаваат (разградуваат) при секоја итерација. Секој дрво придонесува за финалното предвидување (Слика 4.11). Ова е моќна техника за класификациони и регресиони задачи базирана на комбинирано учење (ensemble learning). Ваквиот алгоритам ја подобрува едноставноста на дрвата за одлуки со намалување на ризикот од преклопување, што е вообичаено кај единечните дрва. Во класификацијата, најчестиот излез се смета за конечно предвидување, додека во регресијата, се користи средната вредност или медијаната од

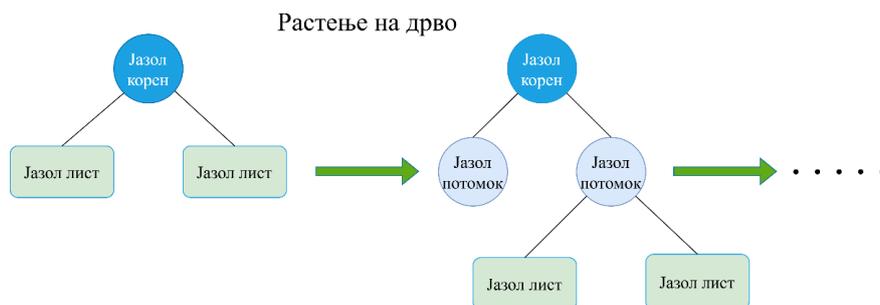
сите дрва. Овој систем осигурува дека моделот не е претерано под влијание на шум и отстапувања во податоците за тренирање. Понатаму, Random Forest способен е ефикасно да управува со големи множества податоци со висока димензионалност и покажува релативно ниска чувствителност на вклучувањето на ирелевантни карактеристики (Yang, et al., 2025).



Слика 4.11 Структурен дијаграм на алгоритмот на случајни дрва (Yang, et al., 2025)

б) Алгоритам со екстремно градиентно засилување (XGBoost)

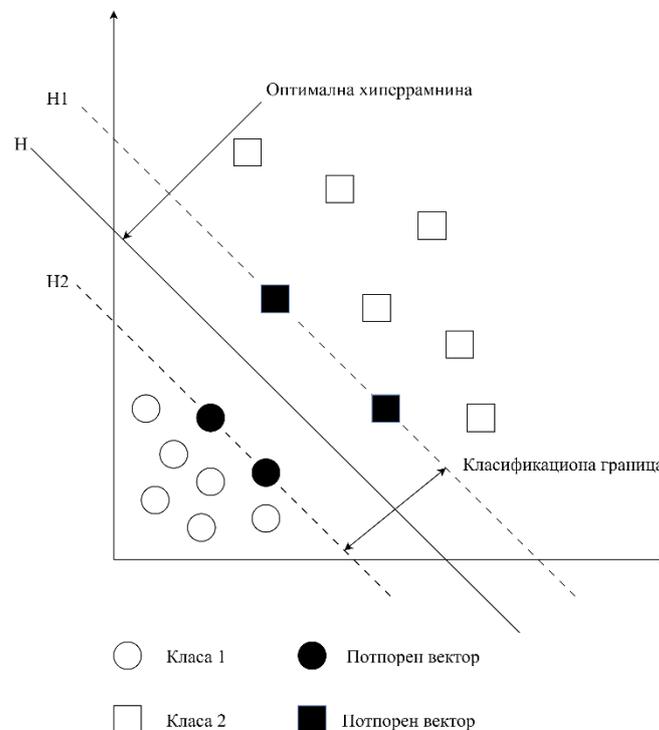
Засилувањето е средство за извршување на повеќе модели со различни тежини за да се намали грешката. На почеток се гради поедноставно дрво (модел) и се мери грешката, а потоа додава нови дрва кои учат (Слика 4.12), за да ги намалат грешките (Olson & Wu, 2020). XGBoost моментално е еден од најбрзите и најинтегрирани алгоритми со дрва на одлуки. Тој користи дрво за класификација и регресија (classification and regression tree-CART) како основен класификатор, со повеќе корелирани дрвја на одлуки кои донесуваат одлуки колективно, оттука, влезните примероци за следното дрво на одлучување се поврзани со резултатите од обуката и предвидувањето од претходното дрво на одлучување. Овој алгоритам претставува многу флексибилна и разновидна алатка способна да реши повеќето проблеми со регресија и класификација, како и кориснички дефинирани целни функции (Ju, et al., 2025).



Слика 4.12 Основна структура на XGBoost моделот на дрва (Zhao, Wang, Li, Guo, & Lin, 2023)

в) Потпорна векторска машина (Support vector machine-SVM)

Потпорната векторска машина е алгоритам за надгледувано учење кој создава функции за учење од множество означени податоци за обука. Има солидна теоретска основа и бара релативно мал број примероци за обука, а експериментите покажуваат дека е нечувствителен на бројот на димензии на примерокот. Првично, алгоритмот се справува со општиот проблем на учење за разликување помеѓу членови на две класи претставени како n -димензионални вектори. Функцијата може да биде функција за класификација (излезот е бинарен) или функцијата може да биде општа регресивна функција (Kantardzic, 2020; Olson & Wu, 2020). Овој алгоритам ги дели податоците во две групи со осмислување на хиперрамнина како површина за одлучување. Со други зборови, множеството податоци е одвоено со „оптималната“ хиперрамнина како што е прикажано на (Слика 4.13). Оптималната рамнина за одлучување може да се одреди со максимизирање на маргината на одвојување помеѓу членовите на двете класи, односно со максимизирање на маргината на класификација помеѓу граничните линии на одлучување H_1 и H_2 , кои се паралелни со оптималната линија за класификација (или хиперрамнина) (Sun, Feng, & Yang, 2018).



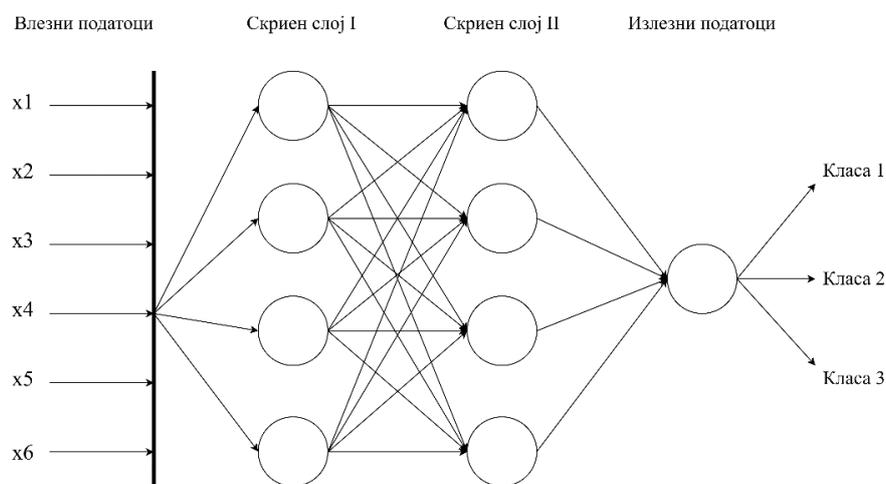
Слика 4.13 Шемајски дијаграм на хиперрамнина (Sun, Feng, & Yang, 2018)

г) Други актуелни алгоритми

Постојат и други алгоритми кои, иако поретко се користат за ризици кај тунелите, сепак се актуелни во светски рамки: различни алгоритми со засилување (GBoost, LightGBM, CatBoost, AdaBoost), k-Nearest Neighbors (kNN), Bayesian Ridge, Perceptron, Apriori, Q-Learning, SARSA и други (Binu & Rajakumar, 2021; Kantardzic, 2020; Karasan, 2022; Olson & Wu, 2020; Witten, Frank, Hall, & Pal, 2017). Секој алгоритам има различна цел, но сличен принцип на работа, каде што користи дел од базата на податоци за тренирање, а останатиот за тестирање и валидација.

4.3.3 Вештачки невронски мрежи (Artificial Neural Networks)

Иако, во одредени литератури вештачките невронски мрежи се категоризираат како алгоритам, тие всушност претставуваат апстрактен компјутерски модел на човечкиот мозок. Невронска мрежа како што сугерира името, е мрежна структура која се состои од голем број јазли поврзани преку насочени врски. Секој јазол претставува единица за обработка, а врските меѓу јазлите ја одредуваат причинско-последичната врска меѓу поврзаните јазли. Сите јазли се адаптивни, што значи дека излезите на овие јазли зависат од модифицирачки параметри кои се однесуваат на овие јазли. Основните мрежи (feedforward), каде податоците се во една насока (од влез кон излез) се користат за класификација и регресија, а може да бидат со еден или повеќе скриени слоеви (Слика 4.14). Мрежата учи за својата околина преку интерактивен процес на прилагодувања што се применуваат на поврзувачките тежини (Kantardzic, 2020; Zhou H. , 2023).



Слика 4.14 Пример од основна невронска мрежа (Zhou H. , 2023)

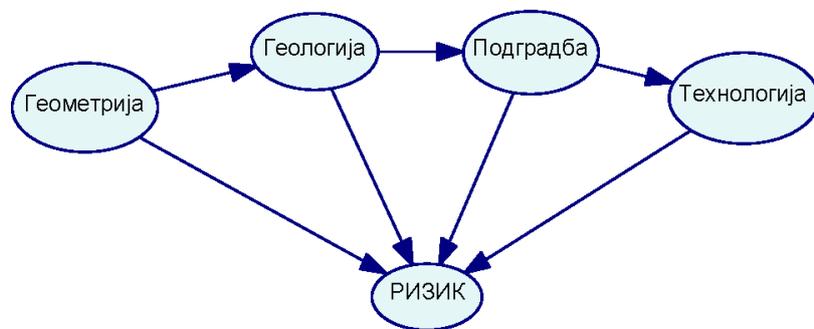
Покрај основните (класични) мрежи постојат и варијации како конволуциона невронска мрежа (Convolutional Neural Network-CNN) која се користи за анализа на слики и просторни податоци (Слика 4.15), рекурентна невронска мрежа (Recurrent Neural Network-RNN) со повратни врски што е добра за временски серии и секвенцијални податоци, само-организирачки мапи (Self-Organizing Maps-SOM) што се користат за визуелизација на податоци, генеративни мрежи (Generative Networks-GAN) за генерирање или реконструкција на податоци (Kantardzic, 2020; Khodabakhshian, 2023; Shan, He, Xu, Armaghani, & Sheng, 2023; Zhou H. , 2023; Yang & Chen, 2025).



Слика 4.15 Процес на процена на ризици во тунели со примена на модифицирана CNN (Yang & Chen, 2025)

4.3.4 Бајесови мрежи (Bayesian networks)

Бајесовите мрежи се насочени графички модели за претставување на заедничка веројатност на низа од случајни променливи. Овие променливи се симболизирани со јазли во Бајесовата мрежа, а зависностите помеѓу нив се прикажани со насочени врски (Špačková, 2012). Овие мрежи познати и како мрежи на верување, може да се користат во било која фаза на анализа на ризиците (Слика 4.16). Тие се моќна алатка за моделирање бидејќи може да комбинираат знаење од различни видови. Оваа комбинација, овозможена е од веројатносното претставување и комбинацијата на состојби. Структурата на моделот, како и процената на параметрите на моделот, може да се изградат автоматски или рачно од: податоци од искуства, експертски проценки базирани главно на логички правила, равенки и бази на податоци на системските состојби или набљудувања. Со користење на објективни или субјективни веројатности, Бајесовите мрежи може да формализираат причинско-последични односи или зависности/независности помеѓу променливите (Ettouney & Alampalli, 2017; Weber & Simon, 2016).



Слика 4.16 Пример од едноставна Бајесова мрежа за ризик кај тунели

Влезните податоци во Бајесовите мрежи вклучуваат (Fenton & Neil, 2018; Khodabakhshian, 2023):

- Дефинирање на систем од променливи и врски помеѓу нив (Directed Acyclic Graph-DAG);
- Специфицирани условни веројатности (Conditional Probability Table-CPT);
- По потреба во мрежата се додаваат докази и ажурирани верувања.

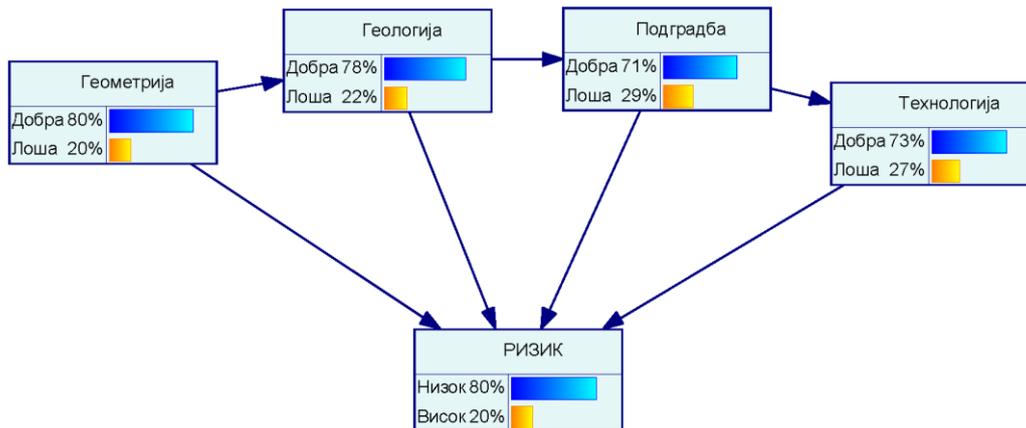
Самите променливи се прикажани како јазли кои може да претставуваат состојба, шанса, одлука, корисност или равенка. Повеќето Бајесови мрежи вклучуваат дискретни променливи или концептуално континуирани променливи кои се дискретизирани за потребите на расудување. Функцијата на заедничка веројатност на мрежата се пресметува користејќи го правилото на синцир (chain rule) слично како кај дрвото на грешки (Sousa, 2010; Špačková, 2012; Weber & Simon, 2016):

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \text{претходни}(X_i)) \quad (4.8)$$

$P(X_i)$ – веројатност на јазлите X

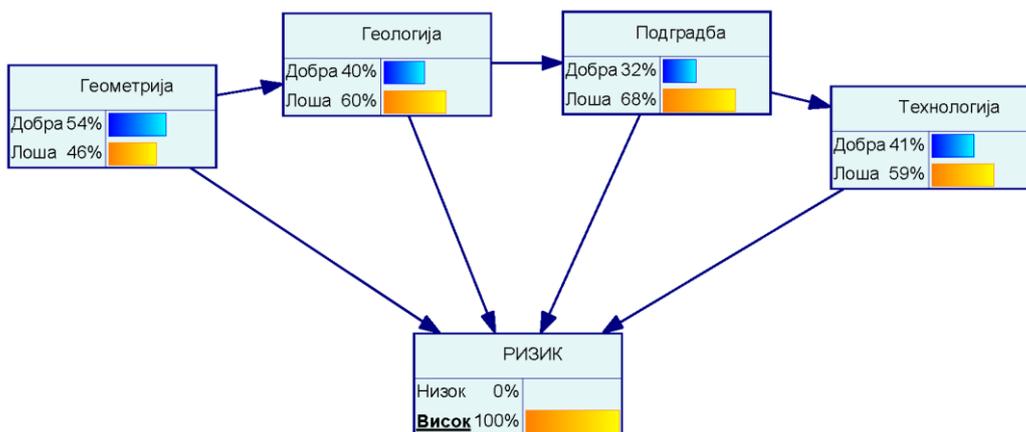
претходни (X_i) – претходни (parent) јазли на X_i

На (Слика 4.17) претставена е едноставна Бајесова мрежа со 5 јазли за процена на ризик кај тунели. Секој јазол има 2 состојби (или веројатности на појави на состојби) и 7 директни врски помеѓу јазлите. Со ова се добиваат вкупно 10 состојби, 46 параметри и 23 независни параметри (број на вредности p кои е потребно да се внесат, бидејќи останатите се добиваат како $1 - p$). На крајот се добива веројатноста на појава која е пресметана преку Бајесовиот принцип, односно 80% (0,8) низок ризик и 20% (0,2) висок ризик. Покрај ова може да се одреди и јакоста на влијанието помеѓу јазлите. Врз ризикот најголемо влијание во оваа едноставна мрежа има геологијата, па следуваат подградба, технологија и геометрија.



Слика 4.17 Пример од едноставна Бајесова мрежа за ризик кај тунели со доделени веројатности

Една од можностите во мрежата после нејзиното креирање е употреба на докази, каде што може да се анализираат јазлите при директна промена на состојбите. На (Слика 4.18) прикажано е како при дефинирање на 100% висок ризик доаѓа до промена на веројатностите во останатите јазли.

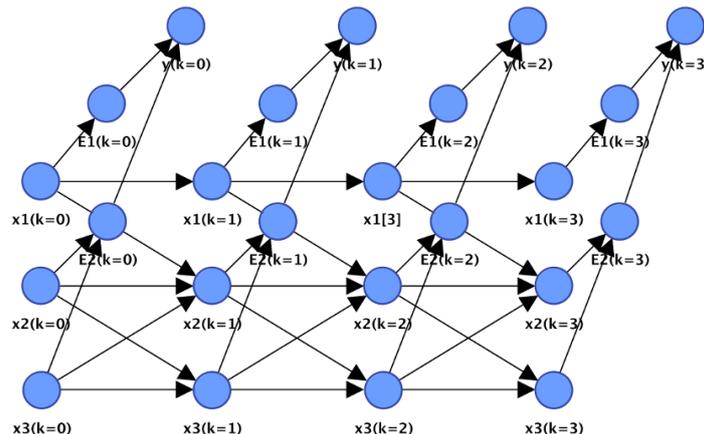


Слика 4.18 Пример од едноставна Бајесова мрежа за ризик кај тунели со доказ за 100% висок ризик

Бајесовите пристапи претставуваат многу корисни методи за управување со ризици при градежни проекти поради нивната способност за: моделирање комплексни проблеми и врските помеѓу нив, претставување и справување со високо ниво на несигурност, комбинирање на различни извори на информации, примена на субјективни, објективни и

нецелосни податоци во квантитативна форма, флексибилност да се интегрираат со други методи за да се подобри точноста и сигурноста (Khodabakhshian, 2023).

Посебен вид на Бајесовите мрежи се динамичките Бајесови мрежи кои се користат за моделирање на промени (случајни променливи) во текот на времето, односно стохастички процеси (Слика 4.19). Ова не значи дека структурата или параметрите на мрежата се менуваат динамички, туку дека се моделира динамички систем, најчесто со примена на повеќе јазли кои ги претставуваат променливите во различен период ($k=0, 1, 2, \dots, n$) или диференцијални равенки (Špračková, 2012; Weber & Simon, 2016).



Слика 4.19 Пример од развивање на динамичка Бајесова мрежа со условна зависноста помеѓу јазлиите (Weber & Simon, 2016)

Со Бајесовите мрежи има и можност за учење и предвидување на податоци со процесот на тренирање, тестирање и валидација. Постојат повеќе алгоритми кои се користат за учење на структурата на мрежата и доделување на зависни веројатности (BayesFusion, 2024; Kitson, Constantinou, Guo, Liu, & Chobtham, 2023; Scutari, Graafland, & Gutiérrez, 2019):

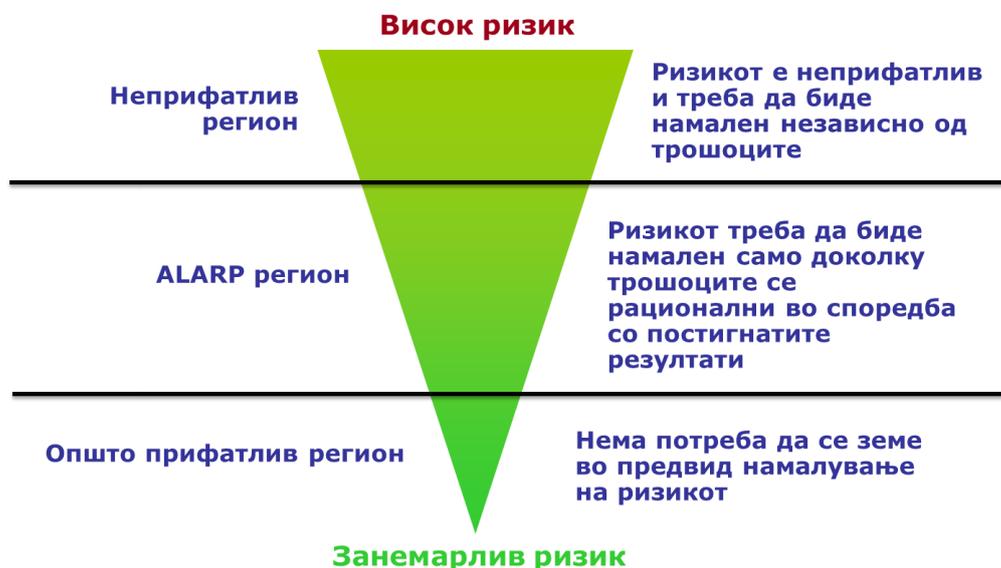
- Ориентирани на класификација: Naive Bayes, TAN (Tree Augmented Naive Bayes), ANB (Augmented Naive Bayes);
- Базирани на ограничувања (constraint-based): PC (Peter Spirtes and Clark Glymour), FCI (Fast Causal Inference), GS (Grow-Shrink);
- Базирани на резултати (score-based): Hill Climbing (HC), tabu search, simulated annealing, K2, GES (Greedy Equivalence Search), Bayesian Search, GTT (Greedy Thick Thinning);
- Хибридни: Max-Min Hill Climbing (MMHC), MMPC (Max-Min Parents and Children), H2PC (Hybrid HPC + Hill Climbing).

Кај повеќето од овие алгоритми има можност претходно да влијае за разработка на структурата (background knowledge), со што се дефинираат врски или забрани за врски помеѓу јазлите. Кај дел од алгоритмите се дефинира само максималниот број на претходни (parent) јазли кој може да го имаат, а кај други може да се дефинира и време на пребарување на податоците, број на итерации, големина на примероци и целна (класна) променлива.

4.4 Евалуација на проценети ризици

Откако ќе се проценат хазардите и ризиците, добиените резултати треба да се анализираат со цел да се предложат соодветни мерки за нивен третман. Генерално анализата се состои од класифицирање, рангирање и споредување на проценетите ризици во однос на претходно дефинирани параметри. Класификациите или системите за рангирање може да се дефинирани специјално за самиот проект, но најчесто нивното потекло е базирано на подетални истражувања на претходни и актуелни проблеми и искуства во оваа област, кои најчесто се прикажани во вид на правилници или упатства (Alleman & Quigley, 2024; ISO3100, 2018). Една од главните цели при овие евалуации е да се дефинира таканареченото прифатливо (толерантно) ниво на ризик. Во однос на ова ниво може да одредат и останатите нивоа (класи) и соодветно да се одредат потребните мерки. Големо влијание при класификација има типот на резултатите, поточно дали тоа претставува квалитативен опис или квантитативна вредност (Ettouney & Alampalli, 2017).

Еден од концептите за класификација и одредување на прифатливото ниво на ризик е ALARP (as low as reasonably practicable) кој е развиен во Велика Британија во 1974 година, односно потекнува од одлуката за здравје и заштита при работа, донесена од страна на парламентот. Самото име на овој принцип „Најниско можно ниво ризик колку е разумно практично“ ја објаснува неговата суштина, која потенцира дека ризиците треба да се доведат до нивното најниско можно ниво. Според ALARP, постојат три нивоа на ризик кои најчесто се претставуваат во форма на дијаграм (Слика 4.20). Овој принцип може да се употреби за квалитативно и квантитативно класифицирање на ризиците (HSE, 2001). Негативната страна, е што најчесто се нудат само три класи односно региони, кои не секогаш може да ги опишат проблемите.



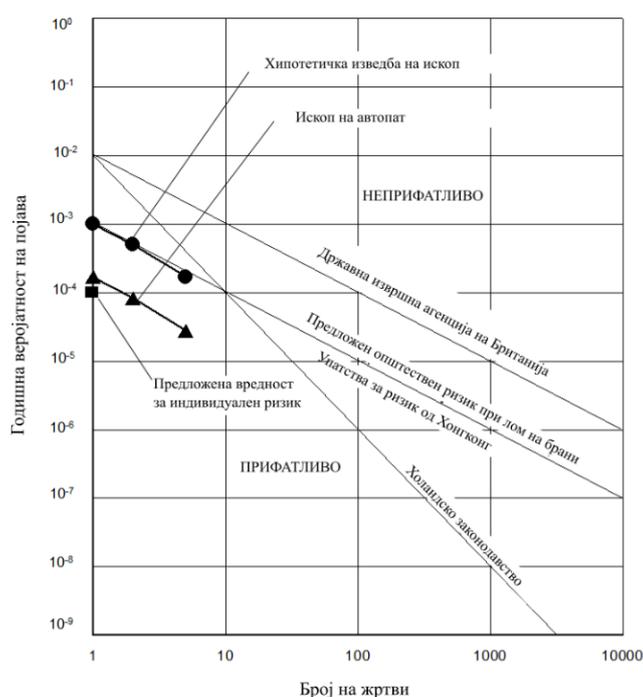
Слика 4.20 Овие критериуми на принципот ALARP (HSE, 2001)

Прифатливото ниво на ризик во квантитативна смисла е истражувано од страна на многу луѓе и организации, со цел да се добијат вредности кои се општо прифатливи во нивните матични држави и светот. Доколку се применуваат матрици на ризик, кои претставуваат комбинација од 5 веројатности и 5 последици (Табела 4.1), најчесто добиваат 4 исходи на ризик (Табела 4.10).

Табела 4.10 Класификација на ризици и активности кои треба да бидат превземени (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004)

Класификација на ризик	Примери за активности кои треба да бидат превземени за секоја класа
Неприфатливо	Ризикот треба да биде редуциран најмалку на Непосакуван, независно од чинењето за негово намалување (ублажување).
Непосакувано	Мерките за намалување на ризикот треба да бидат идентифицирани. Имплементирањето на овие мерки се прави доколку нивните трошоци се во разумни граници, во однос на добиениот резултат (принципот ALARP – As Low As Reasonably Practicable).
Прифатливо	Не се врши менаџирање на hazardите низ проектот. Не е потребно намалување на ризикот.
Занемарливо	Не е потребно понатамошно разгледување на ризиците.

Најкритичните ризици во општеството се оние со најголеми последици, а тоа претставуваат човечките жртви. Најчесто при анализите прво се разгледуваат овие ризици и затоа во литературата има голем број на податоци и вредности претставени во однос на бројот на жртви за одреден временски период. Границите на прифатливост кај тунелите и општо во градежништвото, се во опсег од 10^{-2} до 10^{-4} , која што и често се смета како ALARP зона или прифатлива област. Овие вредности се однесуваат на веројатноста на појава на една човечка жртва во одреден период, кој најчесто се зема да биде една година. Дијаграмот кој на апсисната оска ги содржи последиците (жртвите), а на ординатата веројатностите, во литературата се среќава и како F-N (Frequency-Number) дијаграм или F-N крива на (Слика 4.21). Ваквото претставување на ризиците е доста често поради практичноста и едноставноста (Borghetti, Cerean, Derudi, & Frassoldati, 2019; Derudi, Borghetti, & Frassoldati, 2025).



Слика 4.21 Споредба помеѓу различни критериуми за прифатливо ниво на ризик (Ноек, 2006)

Во Австрискиот правилник за транспорт на опасни материи низ патни тунели, прифатливиот ризик е во граници од 10^{-3} за десет до 10^{-9} за десет илјади жртви. Ова важи само за тунели со должина од 1,00 km, додека за останатите се прави соодветна пресметка. За една до десет жртви нема ограничувања. Исти вредности се користат и во Холандија, но важат само за подводни тунели. Според Италијанскиот метод за анализа на ризиците, за една жртва горната граница изнесува 10^{-1} , а долната 10^{-4} . Вредностите се во однос на патни тунели во оваа држава. Регионот помеѓу границите го претставуваат принципот ALARP. Во Чешка нема официјални документи за критериумот на прифатливо ниво на ризик кај тунелите. Податоците се базирани на генералните препораки за Чешките патни тунели. Границите за една жртва се од 10^{-2} до 10^{-4} и истите се препорачуваат за тунели со должина од 1,00 km. Слични вакви критериуми на прифатливост има и во други европски држави како Швајцарија, Германија и Франција со одредени варијации. Повеќето од претставените критериумите за прифатлив ризик во овие држави, се однесуваат за патни тунели кои се во фаза на експлоатација. Притоа влијателни параметри за безбедноста се: типот на сообраќај (еднонасочен или двонасочен), техничките карактеристики на тунелот (должина, ширина, надолжен наклон), дозволената брзина на движење, просечниот сообраќај (ПГДС), процентот на тешки товарни возила, системот за вентилација, растојание помеѓу излезите во случај на опасност и друго (Technical Committee C.4, 2013).

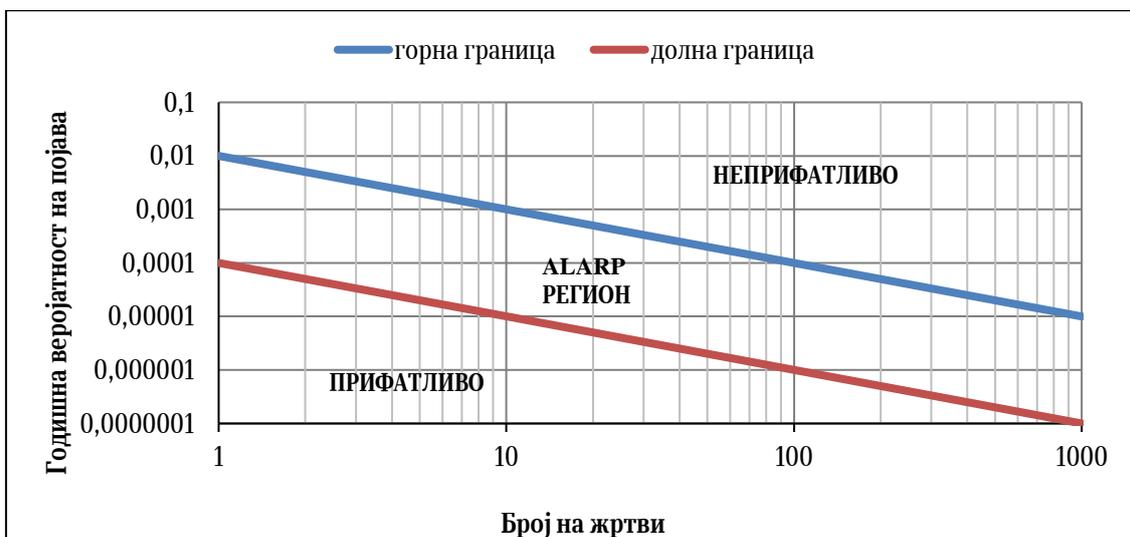
Во нашата држава нема никакви правилници и упатства кои го дефинираат прифатливото ниво на ризик. За таа цел, предложени се граници на прифатливото ниво на ризик кои би можеле да се користат за секаков тип на тунели, и се слични на претходно споменатите граници во европските земји (Слика 4.22). За веројатноста (фреквенцијата) на појава на жртви, усвоените граници се базираат на претходно наведените критериуми. Истите се изразуваат преку следните равенки:

$$\text{горна граница: } F_1 = 10^{-2} * N^{-1} \quad \text{за } 1 \leq N \leq 1000 \text{ жртви} \quad (4.9)$$

$$\text{долна граница: } F_2 = 10^{-4} * N^{-1} \quad \text{за } 1 \leq N \leq 1000 \text{ жртви} \quad (4.10)$$

F – веројатност на појава;

N – број на човечки жртви.



Слика 4.22 Предложен дијаграм за прифатливо ниво на ризик кај тунели во однос на број на очекувани жртви

Веројатноста на појава на ризиците е финалната вредност, односно резултатот од квантитативната процена. Класификација која се однесува на потенцијалниот број на настани (ризичи) при целиот временски период за изградба на еден тунел е предложена од ИТА (Табела 4.11).

Табела 4.11 Класификација за веројатноста на појава на ризици кај тунелиите според ИТА (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004)

Дескриптивна класа на фреквенции	Класа	Интервал	Централна вредност
Многу веројатно	5	> 0,3	1
Веројатно	4	0,03 - 0,3	0,1
Повремено	3	0,003 - 0,03	0,01
Малку веројатно	2	0,0003 - 0,003	0,001
Неверојатно	1	< 0,0003	0,0001

*централната вредност претставува логаритамска средна вредност на дадениот интервал

Во упатствата издадени од страна на ИТА постојат неколку класификации во однос на последиците предизвикани од хазарди во тунелоградбата. Овие класификации се базираат на проект за подземна конструкција со проценета вредност од околу 1 милијарда евра и времетраење од 5 до 7 години. Нивната примена во однос на последиците врз луѓето може да биде универзална, додека временските и економските загуби, главно важат за многу големи проекти со голем капитал (Табела 4.12).

Табела 4.12 Класификации на последици кај тунелиите (Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004)

	Катастрофална	Тешка	Сериозна	Значителна	Занемарлива
Број на жртви	Ж > 10	10 ≥ Ж > 1	1 Ж	Без жртви	Без жртви
Број на повредени	/	СП > 10	10 ≥ СП > 1	1 СП, 10 ≥ МП > 1	1 МП
Доцнење (месеци)	> 24	6 - 24	2 - 6	1/2 - 2	< 1/2
Загуба во милиони евра	> 30	3 - 30	0,3 - 3	0,03 - 0,3	< 0,03

*Ж - жртви; СП - сериозна повреда; МП - мала повреда;

На база на подетални истражувања, предложена е класификација која ги зема предвид економските и временските загуби, кои и најчесто се тесно поврзани (Табела 4.13). Класификација не ги изразува последиците преку директни (фикси) вредности, туку како процентуално зголемување на првично дефинираните вредности на проектот. Ваквата класификација е применета за евалуација на ризиците во главната анализа од ова истражување.

Табела 4.13 Предложена класификација за економски и временски последици кај тунелиите

	Катастрофално	Тешко	Сериозно	Значително	Занемарливо
Влијание врз трошоците и времето на проектот	> 50 %	10 - 50 %	1 - 10 %	0,1 - 1 %	< 0,1 %

4.5 Третман на ризици

Третманот на неприфатливи и непосакувани ризици може да се направи на повеќе начини. Ризиците може да бидат избегнати, намалени (ублажени) или пренесени. Некои ризици може да бидат избегнати со адаптирање на поробуствен метод на градба или пак поместување на трасата, доколку е можно. Други ризици може да бидат пренесени на осигурителните компании. Меѓутоа, повеќето од ризиците мора да бидат намалени (ублажени) на прифатливо ниво. Намалувањето на ризиците може да се гледа како дел од работата за осигурување на квалитетот. Оптималните методи за намалување на ризиците се насочени кон епистемичната природа на несигурностите, што имплицира дека ризиците можат да бидат намалени со добивање на дополнителни информации (Stille, 2017).

Мерките за третман на ризикот може да опфатат една или повеќе од следниве опции (ISO3100, 2018; PMI, 2017):

- Избегнување на ризикот, преку одлука да не се започне или да не се продолжи со активноста која го предизвикува ризикот;
- Прифаќање или зголемување на ризикот со цел искористување на одредена можност;
- Отстранување на изворот на ризикот;
- Промена на веројатноста за појава на ризикот;
- Промена на последиците доколку ризикот се реализира;
- Споделување на ризикот (на пример, преку договори или купување осигурување);
- Задржување на ризикот врз основа на информирана одлука.

Изборот на соодветна стратегија и мерки треба да се изврши во околина на добра кооперативност помеѓу засегнатите страни. Најчесто врз изборот влијаат следните параметри (Ettouney & Alampalli, 2017; Smith, Merna, & Jobling, 2006):

- Резултатите од анализите и процената на ризиците;
- Типот на проектот;
- Големината на проектот;
- Големината на капиталот (буџетот);
- Проектната фаза;
- Засегнатите страни;
- Можноста за имплементирање на предложените мерки;

- Можноста за следење на ефектите од предложените мерки.

Покрај големиот број на мерки (Табела 4.14) кои може да се применат во различни проектни фази кај тунелите, важно е да започне со управувањето со ризици што е можно порано. Без соодветен пристап кон ризиците, многу потешко е справувањето со несигурностите, хазардите и последиците.

Табела 4.14 Пример од мерки за справување со ризици кај тунелски проекти во различни фази (DAUB-Working Group, 2022; Gebremeskel & Gebregziabher, 2021)

Фаза	Мерки и активности
Фаза на проектирање	Детална студија/консултација со националните тела Соодветни и ревидирани теренски истражувања Анализа на претходни проекти Избор на соодветен метод за проектирање Оптимизација на трасата Избор на соодветен систем за доставување на проектот
Фаза на изградба	Избор на соодветна метода и технологија за изградба Поставување на заштитни бариери и предупредувања Обезбедување програма за обука на работниците Дневен мониторинг на ископот Обезбедување на соодветна вентилација и осветлување Инспекција на поставената подградба Контролирано минирање при отсуство на работници Користење соодветни процедури и техники за подградба Ограничување на подземно чување на хемикалии Времена проверка и одржување на механизацијата
Фаза на експлоатација	Мониторинг на сообраќајот Инсталација на ефективна опрема за комуникација Соодветна вентилација и осветлување Контролирано мерење на деформации и слегнувања Поставување на соодветен дренажен систем Обезбедување на систем за противпожарна заштита

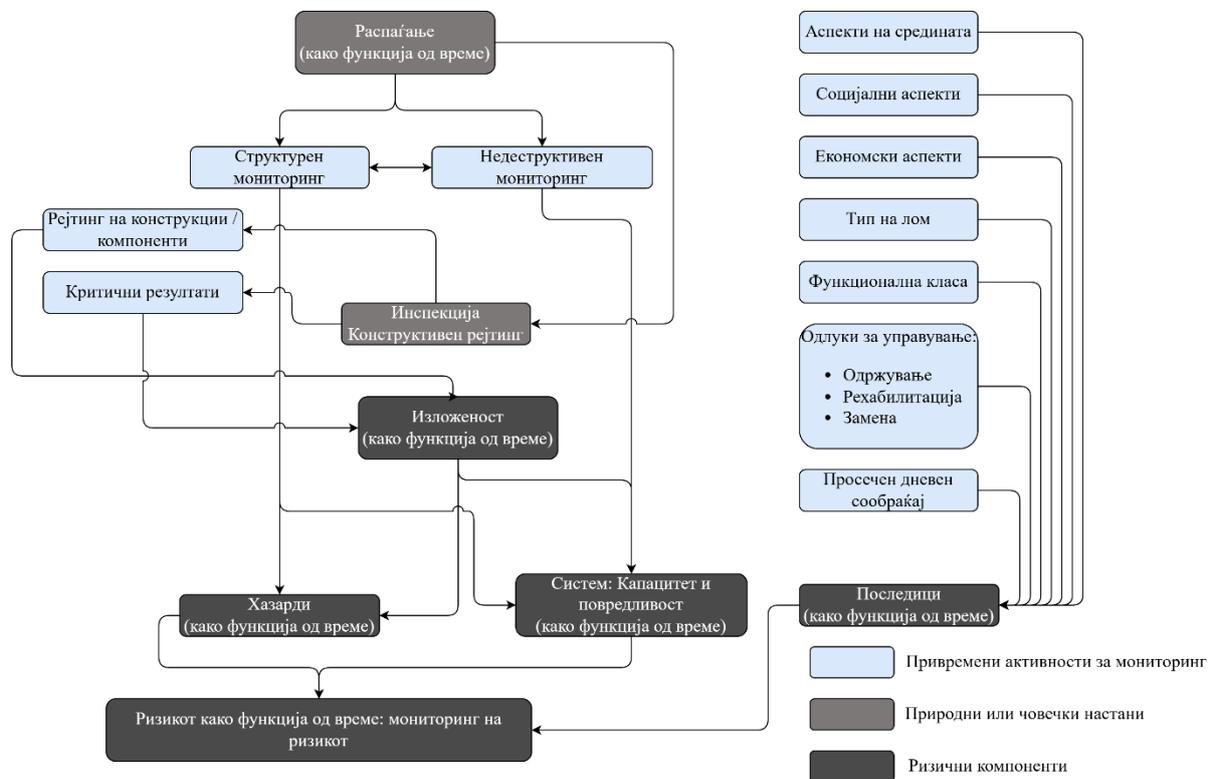
Во раните фази на проектирање и во делот на тендерирање, одредени ризици може да се пренесат, други да се задржат и некои ризици може да се елиминираат и/или намалат (ублажат). Во фаза на изведба, можностите за пренесување на ризиците се минимални и најповолната стратегија за инвеститорот и изведувачот е насочена кон намалувањето на интензитетот на што поголем број на ризици. Изведувачот мора да идентификува хазарди и да класифицира ризици согласно системите кои ги користи инвеститорот и треба да предложи мерки за намалување на идентификуваните ризици. Стратегијата за управување со ризици треба да биде имплементирана од страна на сите членови, независно од нивната работна функција. Се препорачува изведувачот да води проектен регистар на ризици кој ги содржи сите детали за хазардите и ризиците. Сите несреќи, незгоди, и критични ситуации треба да бидат евидентирани и истражени. Мора да се осмислат, спроведат и ажурираат планови за непредвидени и итни случаи низ целиот период на изведба. Ова би инволвирало кооперативност и комуникација со сите страни вклучени во проектот и јавните служби за итни случаи. За да се достигне одредено ниво на квалитет, прво мора да се открие што точно сака инвеститорот и да се види дека тоа одредено нешто е направено или изградено. Исто така, важно е да се осигура дека тоа нешто е правилно изработено или изградено, бидејќи неправилната изработка може да доведе до зголемени трошоци за одржување кои инвеститорот не ги предвидел (Alleman & Quigley, 2024; Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004; Stille, 2017).

4.6 Мониторинг и контрола на ризици

Како дел од процесот на управување со ризиците, истите треба редовно да се следат, контролираат и ревидираат за да се потврди дека (IEC/ISO31010, 2009):

- Претпоставките за ризиците остануваат валидни;
- Се постигнуваат очекуваните резултати;
- Резултатите од процената на ризикот се усогласени со реалното искуство;
- Техниките за проценка на ризик се правилно применети;
- Мерките за третман на ризикот се ефективни.

На (Слика 4.23) се прикажани главните компоненти на мониторинг на ризици кои може да најдат примена кај различни градежни конструкции меѓу кои и тунелите.



Слика 4.23 Компоненти на мониторинг на ризици (Ettouney & Alampalli, 2017)

Ова е еден од најмалку дискутираните делови од управувањето со ризици. Главните цели на мониторингот и контролата се (Ettouney & Alampalli, 2017):

- Континуирано следење на ризичните компоненти;
- Предвидување на идни настани;
- Валидирање на моделираните претпоставки;

- Подобрување на севкупната точност на одлуките поврзани со ризиците;
- Подобра комуникација помеѓу засегнатите страни.

Методите за мониторинг (мерење, набљудување) и локацијата на инструментите зависат од теренските услови, методите и технологиите за градба и природата на ризичните настани. Мониторингот е особено важен доколку се работи во урбана средина (Wu, Yang, Li, Huang, & Xu, 2023). Ефектите од изградбата често може да достигнат до површината, каде важно е да се одредат деформациите и слегнувањата и нивните дозволени граници. Главни компоненти на мониторингот при изградба на тунелите се (Ouyang, HaijunWang, Wu, Zhang, & Xue, 2024; Strauss, et al., 2020; Working Group 2, 2011):

- Геодетско снимање;
- Мерење на конвергенции (поместување на контурата на тунелот/ископот);
- Мерења со инклинометри и екстензометри (поместувања во карпеста маса);
- Мерење на напрегањата (во примарната и секундарната подградба);
- Пиезометриски мерења (ниво на вода и хидростатички притисок);
- Инженерскогеолошко картирање на челото на ископот (информации за геолошките формации);
- Мерење на вибрации (одредување на влијание врз други конструкции).

Со интерпретација на податоците од овие „класични“ техники за мониторинг на тунелите, всушност се прави мониторингот и контролата на ризиците во проектот.

Дури и највнимателно планираните и имплементирани мерки за контрола на ризици не секогаш ги даваат очекуваните резултати или може да имаат несакани ефекти. Затоа, фокусот не е само на оние кои се одговорни за процесот на ризици, туку на активно работење на процесот на континуирано подобрување кој е од суштинско значење за управувањето со ризици. Мониторингот и контролата на планираните мерки треба да се одвиваат во сите фази од процесот. Ова вклучува планирање, собирање и анализа на информации, евидентирање на резултатите и давање повратни информации. Квалитетот на управувањето со ризици, исто така треба да се мери (на пр. број на управувани ризици, степен на распределба на сериозноста на ризиците, број и вид на превземени мерки) и треба да се вклучи во извештаите за проектот (DAUB-Working Group, 2022).

Управувањето со ризици треба да биде присутно во сите проектни фази, при што се поставуваат различни цели (Табела 4.15) кои треба да придонесат за подобри проекти за тунели од апсект на несигурности и непредвидени настани.

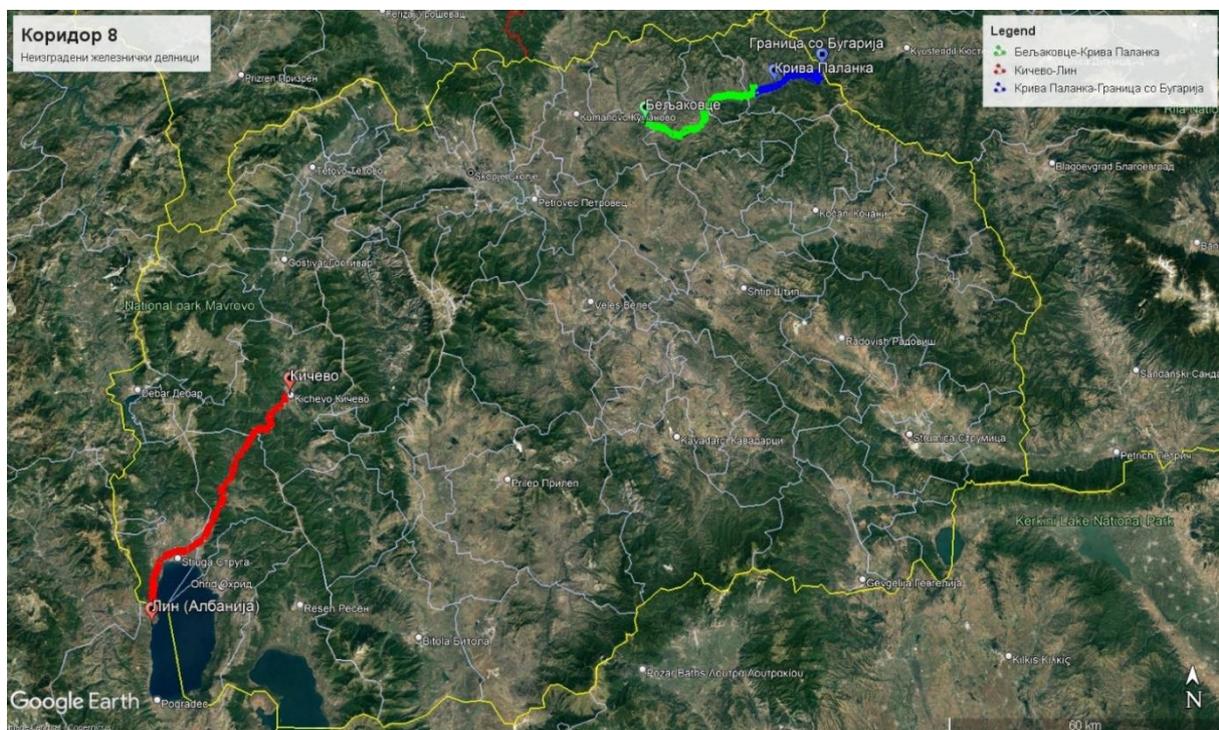
Табела 4.15 Генерални цели кај различни проектни фази во однос на управување со ризици (DAUB-Working Group, 2022)

Проектни фази	Детални фази	Цели (проектирање и изградба)	Цели (управување со ризици)
1. Иницирање	0 Анализа на потребите	Дефинирање на потреби, цели и рамковни услови	/
	1 Собирање на основи	Јасно дефинирање на задачата (плански основи/инвентар)	Спроведување на управувањето со ризик од страна на инвеститорот
2. Проектирање	2 Студија	Доказ за изводливост на најдобрата варијанта и процена на трошоци	Анализа на ризици за сите варијанти, прв пат пресметани трошоци за ризици во вкупната пресметка
	3 Претпроект	Проект оптимизиран и подготвен за имплементација, дефинирани рокови и трошоци	Детална анализа на ризици и планирање на мерки - трошоците за ризици се вклучени во процената
	4 Идеен проект	Добивање на сите потребни одобренија	Ризиците од прифаќање се елиминирани
	5 Основен проект	Дефинирање на проектот со изведбени и работнички цртежи	Мерките за намалување и искористување на можности се вклучени во планот на имплементација
3. Тендерирање	6 Тендерирање	Дефинирани модел на договор и ограничувања на ризик, квалификации и критериуми	Пренесување на наодите од анализата на ризици на понудувачите
	7 Доделување на договор	Избор на изведувач според најповолна понуда	Избор на изведувач со вклучување на неговиот придонес во спречување на ризици
4. Изградба	8 Надзор и документација	Изградба според договорот, во согласност со барањата на проектот	Спроведување на интегрално управување со ризик, вклучени сите страни - финална евалуација
5. Пуштање во употреба	9 Управување со објектот	Осигурување на работа, одржување и вредност	Разгледување на оперативно искуство за управување со ризици кај идни проекти

5. ЖЕЛЕЗНИЧКИ ТУНЕЛИ НА КОРИДОР 8 И РЕЛЕВАНТНИ ПРОЕКТНИ ПОДАТОЦИ

Коридорот 8 е еден од десетте Пан-Европски транспортни коридори кој ги поврзува Јадранското и Црното море преку Албанија, Македонија и Бугарија. Овој коридор ја има следната релација, Драч – Тирана – Елбасан – Скопје – Перник – Софија – Пловдив – Бургас – Варна со должина од 1500km. Во нашата држава овој коридор претставува комбинација од патни и железнички делници, со должина од околу 300km.

Железничката линија претставува постоечка пруга на релација Куманово – Скопје – Тетово – Гостивар – Кичево. Направена е реконструкција на постоечката линија Куманово – Бељаковце со должина од 30km, а предвидена е изградба на нова 57km долга линија меѓу Бељаковце и границата со Бугарија и 63km долга железничка линија меѓу Кичево и границата со Албанија. Неизградените делници во склоп на овој коридор се претставени на (Слика 5.1) (ЈПМЖ-Инфраструктура, 2015-2017).



Слика 5.1 Приказ на неизградените железнички делници на Коридор 8 (Google Earth и Основни проекти за предметните делници)

5.1 Карактеристики за делниците и тунелите

На трите предметни делници на Коридор 8 предвидени се вкупно 49 железнички тунели со должина од 25,5km. Од вкупната должина околу 88% се целосно неизградени (незапочнати), а 12% се делумно изградени тунели со различен степен на изграденост. Притоа делниците во источниот дел од Коридор 8 се соседни и имаат слични карактеристики во однос на местоположбата и локалните услови, додека делницата во западниот дел има сосема различна локација во однос на коридорот и државата, а со тоа и други локални услови.

5.1.1 Делница Бељаковце – Крива Паланка

Првата делница Бељаковце – Крива Паланка е единствена која моментално е во фаза на изградба и има 15 тунели со вкупна должина од 3,7km со различен степен на изграденост (од минатото) и карактеристики (Табела 5.1). Должините на секој тунел посебно не надминуваат повеќе од 1000m (со што би се јавила потребата од дополнителни мерки), а во однос на начинот на изградба покрај НАТМ (Новата Австриска Тунелска Метода) се јавува и Cut & Cover методата („Ископ и покривање“) (ЈПМЖ-Инфраструктура, 2015-2017).

Табела 5.1 Тунели на делница I Бељаковце-Крива Паланка

ДЕЛНИЦА БЕЉАКОВЦЕ – КРИВА ПАЛАНКА (L = 33,99km)							Коментар
Број	Стационажа		Должина m	Претходно изведени работи година	Ниво на претходна изграденост од 0 до 4	Начин на изградба метода	
	од	до					
1	37+949,36	38+448,36	499,00	2004	2	НАТМ	0 - целосно неизградено/ 1 - само ископ/ 2 - ископ и примарна подградба/ 3 - ископ примарна и секундарна подградба/ 4 - ископ, примарна и секундарна подградба и портали или насипување
2	40+777,44	40+963,96	186,52	2004	2	НАТМ	
3	41+625,45	41+989,45	364,00	2004	3,5	НАТМ	
4	42+271,21	42+619,21	348,00	2004	2,5	НАТМ	
5	42+790,98	43+060,98	270,00	2004	2	НАТМ	
6	45+445,00	45+680,00	235,00	/	0	Cut & Cover	
7	49+824,43	50+024,43	200,00	2004	0,5	НАТМ	
8	50+198,70	50+804,20	605,50	2004	0,5	НАТМ	
9	52+785,00	52+915,00	130,00	/	0	Cut & Cover	
10	60+173,42	60+280,36	106,94	2004	3	Cut & Cover	
11	61+556,84	61+656,84	100,00	2004	2	НАТМ	
12	62+440,80	62+514,10	73,30	2004	2	НАТМ	
13	62+689,93	62+958,93	269,00	2004	0,5	НАТМ	
14	63+034,00	63+226,00	192,00	2004	0,1	НАТМ	
15	63+244,50	63+412,50	168,00	2004	0	НАТМ	
ВКУПНО			3747,26				
ВКУПНО 15 тунели од кој 3 целосно неизградени, 4 само или делумен ископ, 5 со ископ и примарна подградба и 3 со ископ, примарна и секундарна подградба.							

5.1.2 Делница Крива Паланка – граница со Бугарија

Втората делница Крива Паланка – граница со Бугарија содржи најголем број на тунели, односно 24 тунели со вкупна должина од 9,6km (Табела 5.2). Два тунели се наоѓаат во урбана средина, односно кај Крива Паланка и се наоѓаат директно под населени места. Три тунели се со должини над 1000m, односно проектирани се со проширувања (ниши), паралелни тунели (со помал профил) и попречни тунели за нивно заемно поврзување. Кај четири тунели, односно на две места предвидена е континуирана ФБО (финална бетонска облога). Два тунели се во зона на станица со три колосеци, односно имаат поголем попречен профил и се единствени на оваа делница кои се предвидени да се изведуваат со Cut & Cover методата. Комплексноста е дополнително зголемена, имајќи ги предвид и

големиот број на соседни конструкции од типот на мостови и вијадукти (ЈПМЖ-Инфраструктура, 2015-2017).

Табела 5.2 Тунели на делница II Крива Паланка-граница со Бугарија

ДЕЛНИЦА КРИВА ПАЛАНКА - ГРАНИЦА СО БУГАРИЈА (L = 23,40km)					
Број	Стационажа		Должина m	Начин на изградба метода	Коментар
	од	до			
1	66+126,00	66+352,70	226,70	НАТМ	
2	66+895,35	67+039,41	144,06	НАТМ	
3	67+155,30	67+356,39	201,09	НАТМ	
4	67+464,66	67+579,90	115,24	НАТМ	
5	68+821,56	68+957,23	135,67	НАТМ	
6	70+516,89	70+657,14	140,25	НАТМ	
7	71+636,02	71+758,60	122,58	НАТМ	Во урбана (населена) средина (Крива Паланка)
8	71+792,88	72+789,77	996,89	НАТМ	Во урбана (населена) средина (Крива Паланка)
9	73+824,63	74+040,55	215,92	НАТМ	
10	74+423,70	74+579,33	155,63	НАТМ	Со споена ФБО, тунел 10 и 11
11	74+596,68	74+759,80	163,12	НАТМ	
11a	74+989,95	75+171,29	181,34	НАТМ	
12	75+968,75	76+156,68	187,93	НАТМ	
13	76+621,70	77+689,40	1067,70	НАТМ	Над 1000 m со паралелен тунел
14	77+799,89	78+058,80	258,91	НАТМ	
15	78+851,77	79+092,00	240,23	НАТМ	Со споена ФБО, тунел 15 и 16
16	79+092,00	79+758,31	666,31	НАТМ	
17	80+570,79	80+639,11	68,32	НАТМ	
18	80+792,57	80+841,83	49,26	Cut & Cover	3 колосоци
18a	80+841,83	80+916,58	74,75	Cut & Cover	3 колосоци и отворен дел од левата страна (како галерија)
19	82+628,00	84+073,00	1445,00	НАТМ	Над 1000 m со паралелен тунел
20	84+237,00	85+564,00	1327,00	НАТМ	Над 1000 m со паралелен тунел
21	85+922,00	86+178,00	256,00	НАТМ	
22	87+192,00	88+365,00	1173,00	НАТМ	Околу 250 m се пробиеени од Македонска страна, а влезот во тунелот е под делумен колапс.
ВКУПНО			9612,90		
ВКУПНО 24 тунели од кои 23 се целосно неизградени, а 1 е делумно ископан без подградба.					

5.1.3 Делница Кичево – граница со Албанија

Третата делница Кичево – граница со Албанија покрај тоа што локациски се разликува од другите делници, истата во одредени делови е проектирана покрај автопат кој е во фаза на изградба и идна автопатска делница која наскоро ќе биде во фаза на изградба. Покрај тоа оваа делница поминува во близина на Охридското езеро, кое претставува подрачје заштитено од страна на УНЕСКО. Десетте тунели кои се проектирани имаат вкупна должина од 12,2km (Табела 5.3). На оваа делница се наоѓаат двата најдолги тунели на Коридорот 8 со должини од 3,1 и 5,6km за кои се предвидени проширувања, паралелни и попречни тунели. Покрај должините тука се јавува и најголемиот надслој со висина од околу 375m. Начинот на изградба кај сите тунели е според НАТМ (ЈПМЖ-Инфраструктура, 2015-2017).

Табела 5.3 Тунели на делница III Кичево-граница со Албанија

ДЕЛНИЦА КИЧЕВО - ГРАНИЦА СО АЛБАНИЈА (L = 63,24km)					
Број	Стационажа		Должина m	Начин на изградба метода	Коментар
	од	до			
1	108+865,00	109+450,00	585,00	НАТМ	
2	109+635,00	109+813,00	178,00	НАТМ	
3	110+195,00	110+455,00	260,00	НАТМ	
4	111+475,00	111+700,00	225,00	НАТМ	
5	113+285,00	113+510,00	225,00	НАТМ	
6	114+805,00	120+415,00	5610,00	НАТМ	Над 1000 m со паралелен тунел
7	122+050,00	122+565,00	515,00	НАТМ	
8	Проектот за овој тунел е подоцна променет, односно дефинирана е изведба на класичен ископ.				
9	135+040,00	136+030,00	990,00	НАТМ	
10	137+850,00	138+290,00	440,00	НАТМ	
11	159+560,00	162+702,00	3142,00	НАТМ	Над 1000 m со паралелен тунел
ВКУПНО			12170,00		
ВКУПНО 10 тунели кои се целосно неизградени					

5.2 Податоци за тунелите од трите делници

Со подетално истражување и анализа на делниците и тунелите во однос на условите, податоците, мерењата и специфичностите, дефинирани се различни начини и пристапи за процена на ризиците, нивна споредба и зависности. Првично се собирани, анализирани и класифицирани податоци за тунелите во однос на:

- Геометриски карактеристики (стационажа, должина, начин на изградба, максимален надслој, надолжен наклон на трасата, радиус на закривување на трасата, површина на слободен профил и ископ);

- Геолошко-геотехнички карактеристики (број/коэффициент на истражни дупнатини, волуменска тежина, кохезија, агол на внатрешно триење, модул на деформација, глобална јакост на карпест масив, RMR (Rock Mass Rating) класификација, RQD (Rock Quality Designation) параметар, GSI (Geological Strength Index) параметар, UCS (Uniaxial Compressive Strength)-едноосијална јакост на притисок, раседи);
- Карактеристики на подградбата (количини на еден метар должен за анкери, прскан бетон, арматурна мрежа, ременати, подградба на чело на ископ, цевен чадот и финална бетонска облога);
- Карактеристики околу технологијата на градба (чекор-должина на ископ, влијание од минирање и подземна вода).

5.2.1 Геометриски податоци

Во генералната претстава на податоците, сите тунели се поделени на одредени сегменти (секции). Секој тунел има различно проектирани сегменти по неговата должина, кои варираат во однос на останатите податоци. Притоа има и сегменти кои се поделени процентуално во подсегменти (Табела 5.4), каде што земена е одредена несигурност (сигурност) во проектирањето, најчесто во делот на геотехничките податоци и подградбата.

Табела 5.4 Пример од сегмент кој е поделен на 3 подсегменти

Сегмент	Почетна стациоња	Крајна стациоња	Должина	Тип на подградба и процентуалност
50	66+153,64	66+324,35	119,50	SI 70%
51			42,68	SVI 25%
52			8,54	SVII 5%

Максималниот надслој претставува висина на карпестата маса (земјаната средина) над тунелот до површината. При помали вредности на надслојот може да се јават слегнувања и деформации на површината над тунелот, што особено е опасно доколку на површината има други конструкции (урбана средина), додека кај големи вредности може да јават напрегања и деформации во зоната на ископот на тунелот (Ponnuswamy & Victor, 2016). Урбана средина над тунелите се јавува кај 2 тунели на втората делница во рамки на Крива Паланка.

Податоците за трасата даваат опис на некои основни параметри кои важат за делови од делниците каде се лоцирани тунелите. Тоа се надолжниот наклон даден во промили и хоризонталниот радиус во метри.

Површината на слободниот профил и површината на ископ се заемно поврзани. Површината на слободниот профил претставува простор во кој ќе поминуваат возовите, односно празен простор после изградбата на самиот тунел. Површината на ископ е најголемиот профил, односно простор во кој треба да се изградат елементите на тунелот. Површината за ископ секогаш е поголема од површината на слободниот профил, а и двете вредности се зависни од елементите на подградбата. Поголемите површини се покомплицирани и поопасни за изградба, а кај овие тунели вакви површини се јавуваат генерално во делот на станици или стојалишта.

5.2.2 Геолошко-геотехнички податоци

Овие податоци содржат различни карактеристики поврзани со средината (околината) каде што се градат тунелите. Во нив има пресметани вредности, класификации и директни теренски мерења.

Бројот на истражни дупнатини е дефиниран во самите проекти. Поголемиот број на истражни дупнатини значи поголема сигурност за дефинирање на геотехничките податоци, односно помал ризик за неочекувани вредности. Бидејќи бројот на дупнатини зависи од должината на тунелот, направен е и коефициент (Табела 5.5) кој претставува количник помеѓу бројот на дупнатини и должината на тунелот во метри (5.1). Бидејќи при некои анализи доаѓа до потешкотии при употреба на многу мали вредности како што е овој коефициент, истиот може да се претстави и во проценти или промили, каде добиената вредност ќе биде помножена со 100 или 1000.

Табела 5.5 Пример од коефициент за истражни дупнатини

Сегмент број	Стационажа		Должина m	Истражни дупнатини	
	од	до		Број на дупнатини	Коефициент [број/должина на тунел во m]
1	37+949,36	38+005,00	55,64	2	0,004
2	38+005,00	38+275,00	270,00	2	0,004
3	38+275,00	38+448,36	173,36	2	0,004

$$\text{Коефициент кај тунел од } 500 \text{ m} = \frac{2}{(55,64+270+173,36)} = 0,004 \quad (5.1)$$

Волуменската тежина, кохезијата и аголот на внатрешно триење се едни од основните физички својства на карпите. Генерално повисоките вредности на овие својства претставуваат поквалитетни (појаки) карпести маси или почви (Gattinoni, Pizzarotti, & Scesi, 2014).

Модулот на деформација на карпестиот масив E_m (според Еверт Хоек) ја претставува крутоста на карпестата маса, односно нејзината способност да се деформира при напрегање (оптоварување). Оваа вредност може да се добие со теренски испитувања или емпириски равенки. Влијателни фактори на овој модул се GSI и влијанието од минирање. Сличен на овој параметар е глобалната јакост на притисок σ_{cm} на карпестиот масив (исто според Хоек) (Хоек, 2006).

RMR (Rock Mass Rating) е класификација за оценка на квалитетот на карпестите маси, која се користи во инженерството и рударството за да се предвиди однесувањето и квалитетот на карпестите маси при изградба на тунели, ископи и други подземни конструкции. Овој систем бил развиен од Биенјавски (Bieniawski) во 1973 година и се базирана на неколку клучни параметри кои влијаат на стабилноста и цврстината на карпестите маси. Вредностите во главните податоци од оваа класификација за секој тунел се дадени во опсег (од-до), а понатаму се користени средните вредности од овие граници (Singh & Goel, 2012).

Во праксата, како показател за степенот на испуканост, многу често се користи т.н. RQD-параметар (анг. Rock Quality Designation). Овој параметар најчесто се одредува со теренски испитувања, каде што се вадат јадра од истражни дупнатини (Gattinoni, Pizzarotti, & Scesi, 2014; Singh & Goel, 2012).

Во 1995 година е воведена класификација, која се нарекува Геолошки индекс на јакост (GSI), која името го добива од терминот Geological Strength Index. Кај оваа класификација вредноста на GSI се дефинира графички, во вид на комбинација на структурата и состојбата на карпестата маса, која се поткрепува со краток текстуален опис (Gattinoni, Pizzarotti, & Scesi, 2014; Hoek, 2006; Singh & Goel, 2012).

Со оглед на тоа што карпите се многу поотпорни кога се изложени на напрегања на притисок, од интерес во инженерството е најчеста потребата за анализа на јакоста на притисок. Се испитува лабораториски на карпести примероци во правилни геометриски форми. Вака определена јакост се нарекува едноосијална или моноосијална јакост на притисок (анг. Uniaxial Compressive Strength - UCS) и претставува гранична јакост на притисок (Singh & Goel, 2012).

Основна форма на вертикалните пореметувања кај карпестите маси се раседите, кои се дефинираат како пукнатини по чија должина дошло до движење на блоковите паралелно на раседната површина. Раседите се најочигледни кога се прекинуваат слоеви на различни карпести маси, а потешко се препознават ако се изразени во склоп на една литолошка средина. Раседна зона се манифестира во вид на потесен или на поширок појас, кој се карактеризира со значителна испуканост, здробеност и трошност на карпите односно многу слаб квалитет. Најчесто кај ваквите места геотехничките податоци (претходните податоци), се со најслаби (најниски) вредности. Раседи може да се одредат (проценат) со теренски методи и истражувања или директно при изградба на тунелот (Gattinoni, Pizzarotti, & Scesi, 2014). Вредностите на овој податок се движат во рамки од 0 до 1, што може да се третира како процентуална веројатност за оваа појава во рамки на сегментот, односно процентуална должина на сегментот каде што ќе се појави расед.

5.2.3 Податоци за подградба

Подградба ја претставуваат елементите (материјалите) кои се поставуваат при изградба на тунелот. Овие елементи, односно димензионирање го прават инженери (проектанти) со различни методи и пристапи со цел да се најде оптималното решение. При димензионирањето се користат сите претходни податоци кои се на располагање. Целта на поставување на подградбата е да се стабилизира тунелскиот отвор при ископувањето, односно да не дојде до несакани последици. Подградбата се дели на 2 дела, и тоа примарна и секундарна подградба.

Примарната подградба е главниот фактор при стабилизација на тунелите при изградба. Оваа подградба ја сочинуваат комбинација од елементи кои со нивно соодветно временско поставување придонесуваат за безбедно градење. Истата се поставува непосредно при ископот на тунелот. За тунелите на трите делници предвидени се следните елементи: анкери, прскан бетон, арматурна мрежа, ременати, подградба-заштита на челото на ископот (прскан бетон) и цевен чадор (предсвод) (Bilotta, et al., 2022; Hoek, 2006).

Секундарната подградба се поставува подоцна при изградбата и генерално служи повеќе во фазата на експлоатација на тунелот, но прифаќа и дел од товарите на примарната подградба (Bilotta, et al., 2022).

Елементите во базата на податоци за анализа на ризици се дадени со вредности (количини) пресметани на 1m' од тунелот (сегментот). Генерално, на сегменти со полоши (послаби) карактеристики има потреба од поголема количина на материјали. Некои материјали се користат само во одредени случаи, најчесто при најлоши геотехнички услови.

5.2.4 Податоци за технологија на изградба

Чекор (сегмент) на ископ е должина во метри со која се напредува во тунелот. Чекорот опфаќа должина на која се прави ископ, па потоа се поставува примарна подградба, пред да се започне со повторен ископ понатаму во тунелот, односно следен чекор.

Во одредени тунели кога не може механички да се прави ископ, се применува минирање. При минирање може да дојде до дополнителни напрегања и оштетувања во околната карпа, па затоа при проектирање се зема предвид како фактор на пореметување (Ноек, 2006). Ова влијание (фактор) е во граници од 0-1.

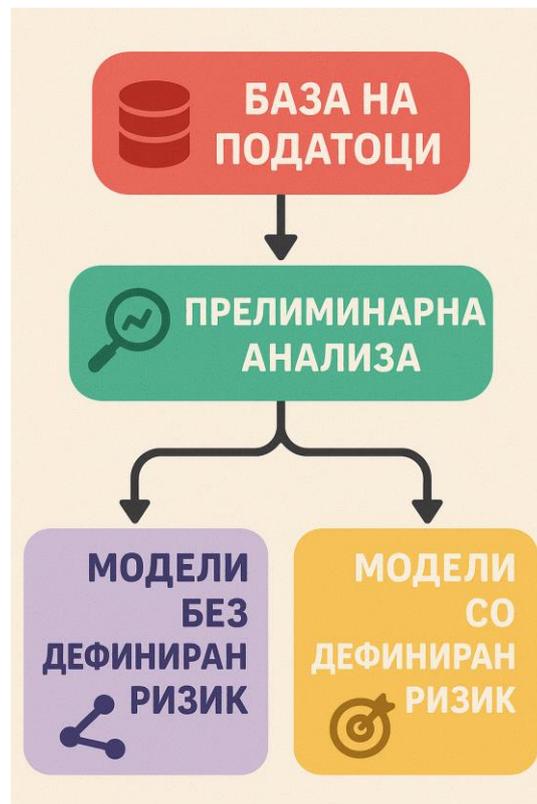
Подземната вода може да предизвика ризици при изградба на тунелите. Нејзиното ниво и количина се одредува со теренски истражувања. Најопасни случаи се кога нивото е во рамки на тунелот и непосредно над него, а количината на вода голема (Duan, Chu, Вu, Li, & Long, 2025; Huang, et al., 2025). Овој податок е земен со вредности од 0-1 како влијание на база на нивото и количината на подземна вода, геотехничките услови и технолошкиот аспект за нејзино управување.

5.3 База на податоци за анализа на ризици

Со дефинираните податоци за тунелите на Коридор 8, првично е направена база (табела) која содржи вкупно 439 сегменти (редици) за сите 49 тунели, од кои 341 сегмент проектиран со НАТМ и 99 сегменти проектирани со Cut & Cover методата. Поточно првата делница има 74, втората 255 и третата 110 сегменти. За секој сегмент има вкупно 38 податоци (колони) од кои 9 се информативни (број на тунел, број на сегмент, почеток и крај на стационожа, претходно изведени работи, ниво на претходна изграденост, метод на изградба, површина на слободен профил и број на дупнатини), а останатите 29 се главните податоци кои се претходно споменати, не вклучувајќи го ризикот кој подоцна се додава како посебна колона во моделите. Дел од податоците првично се претставени во граници (од-до) во две колони, а потоа направено е нивно усреднување со цел да се намали комплексноста. Со ова, бројот на влезни податоци е намален на 26. За анализа на ризиците користени се само сегментите со НАТМ, бидејќи тие го претставуваат најкомплексниот (подземен) дел од тунелите, додека сегментите со Cut&Cover методот имаат поразличен, поедноставен и далеку понеризичен технолошки пристап, па затоа не се анализирани. Според НАТМ првата делница има 48, втората 202 и третата 91 сегмент. Иако втората делница по должина е најмала, таа содржи најголем број на тунели, односно сегменти, што покажува уште пред анализата дека има тенденција да е најризична. Во прилог 10.1 е прикажана базата на податоци со сегменти проектирани според НАТМ и главните компоненти кои се користени понатаму во анализите.

6. РАЗВИВАЊЕ НА МОДЕЛИ ЗА УПРАВУВАЊЕ СО РИЗИЦИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИЈА НА ПРОЕКТИ ЗА ТУНЕЛИ

Во ова истражување целта е да се проценат и анализираат ризиците на основа на податоците за различните карактеристики во тунелите, односно да се развијат модели кои може да се користат при управувањето со ризиците. Дефинирањето на вредностите на податоците е правено со примена на комбинација од проектни, теренски и искуствени информации. Анализите се насочени кон фазата на изградба со оглед дека таа претставува голем генератор на ризици во животниот циклус на проектот (Pamukcu, 2015; Sousa, 2010; Wang, Xiong, Zhu, & Guo, 2023). За подетални квантитативни анализи за процена на ризиците кај тунелите, дефинирани се повеќе модели базирани на класични анализи и напредно машинско учење, со цел да се предвидат веројатности на појава и да се одредат зависимости меѓу влезните параметри (карактеристиките на тунелите) и нивните важности. При анализата првично се користени сите проектни податоци, потоа со разработка на моделите во зависност од важноста или зависноста, направени се елиминации на дел од нив со цел да се подобри точноста. Се разликуваат два концепти на разработка на моделите, односно концепт без и со претходно дефиниран ризик (Слика 6.1).



Слика 6.1 Дијаграм со концепти за разработка на моделиите

6.1 Прелиминарна анализа

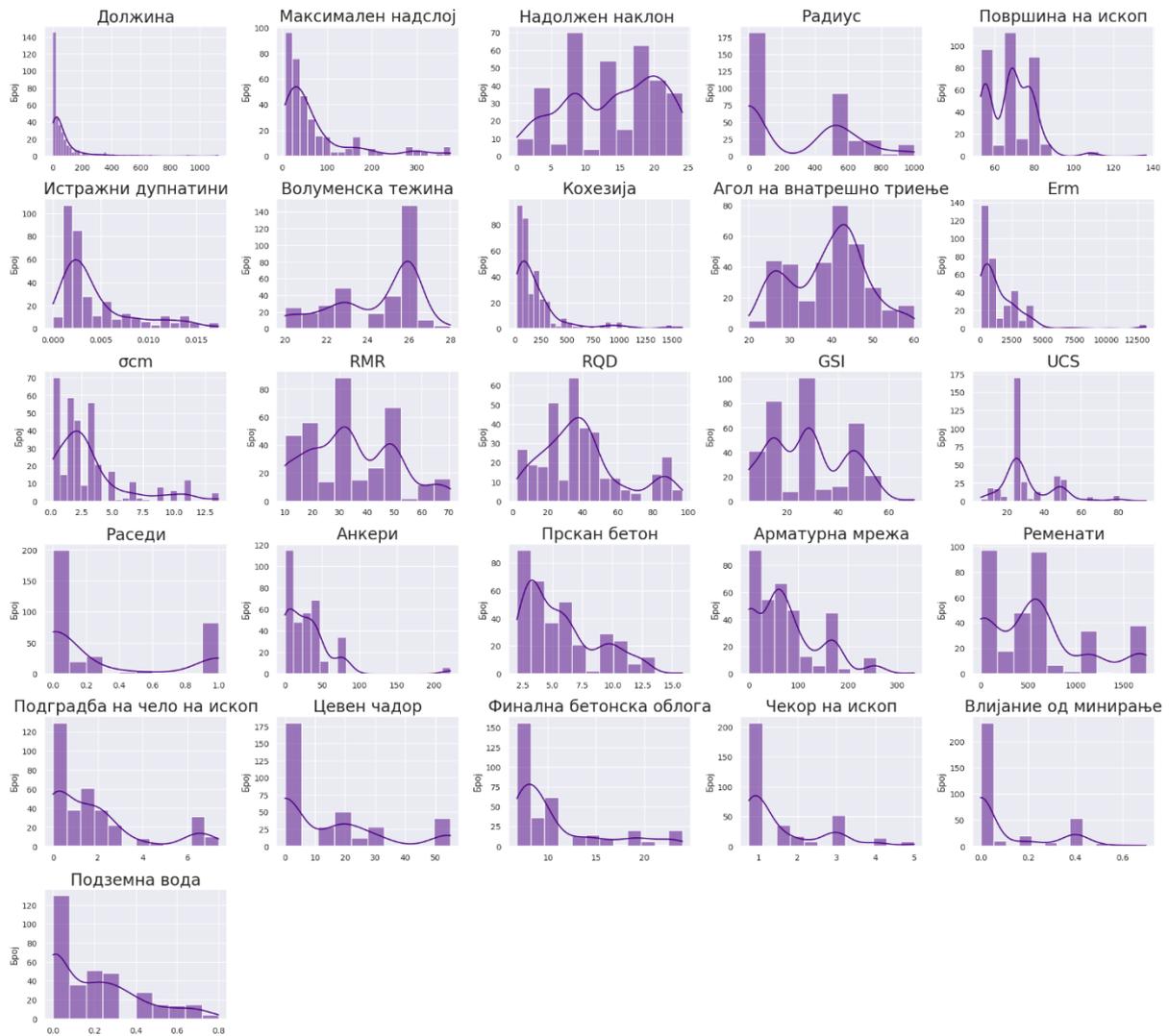
Прелиминарната анализа служи за подобра разработка и употребливост на базата на податоци и првична процена на ризиците и дефинирање на одредени сценарија и зависимости. Деталноста на анализата зависи од проектната фаза, а во одредени случаи (рани проектни фази) може да се примени без дополнителни разработки и процени.

6.1.1 Основни статистички и корелациони анализи

Прво се направени основни статистички (Табела 6.1) и корелациони анализи со цел да се идентификуваат најзначајните фактори, да се направи распределба на вредностите за секој податок и да се дефинираат можности за примена во моделите за процена.

Табела 6.1 Основни статистички вредности за базаа на податоци со 341 сегмент

Податок	Средна вред.	Стандардна девијација	Мин.	Прв квантил (25%)	Втор квантил-медијана (50%)	Трет квантил (75%)	Макс.
Должина	71,19	117,90	2,48	12,07	28,20	76,20	1128,00
Максимален надслој	72,31	84,56	6,00	20,00	39,00	80,00	375,00
Надолжен наклон	13,90	6,91	0,00	8,50	14,40	19,05	24,13
Радиус	279,47	315,82	0,00	0,00	0,00	500,00	1000,00
Површина на ископ	68,52	11,15	53,00	56,00	69,25	76,90	136,60
Истражни дупнатини	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
Волуменска тежина	24,36	2,09	20,00	23,00	25,00	26,00	28,00
Кохезија	208,57	266,56	20,00	60,00	100,00	250,00	1600,00
Агол на внатрешно триење	39,04	9,14	20,00	31,00	40,00	45,00	60,00
E_{tm}	1555,30	2006,87	50,00	410,00	800,00	2500,00	13200,00
σ_{cm}	3,05	2,93	0,20	1,70	2,00	3,70	13,60
RMR	34,32	16,05	10,00	20,00	32,50	48,00	70,50
RQD	39,23	23,13	2,50	24,00	35,50	45,00	96,85
GSI	28,16	14,98	5,00	15,00	27,50	45,00	70,00
UCS	31,43	14,96	6,00	25,00	25,00	37,50	95,00
Раседи	0,28	0,42	0,00	0,00	0,00	0,60	1,00
Анкери	29,47	35,09	0,00	0,00	24,00	41,33	222,00
Прскан бетон	5,65	3,00	2,00	3,15	5,09	7,19	15,85
Арматурна мрежа	73,99	67,21	0,00	0,00	62,52	96,29	334,16
Ременати	584,87	520,64	0,00	0,00	522,33	685,00	1740,00
Подградба на чело на ископ	1,78	2,08	0,00	0,00	1,58	2,28	7,38
Цевен чадор	14,20	18,20	0,00	0,00	0,00	20,00	55,00
Финална бетонска облога	10,75	4,71	6,78	7,87	8,82	13,02	23,95
Чекор на ископ	1,59	1,07	0,75	0,75	1,00	2,00	5,00
Влијание од минирање	0,11	0,18	0,00	0,00	0,00	0,20	0,70
Подземна вода	0,20	0,22	0,00	0,00	0,20	0,30	0,80

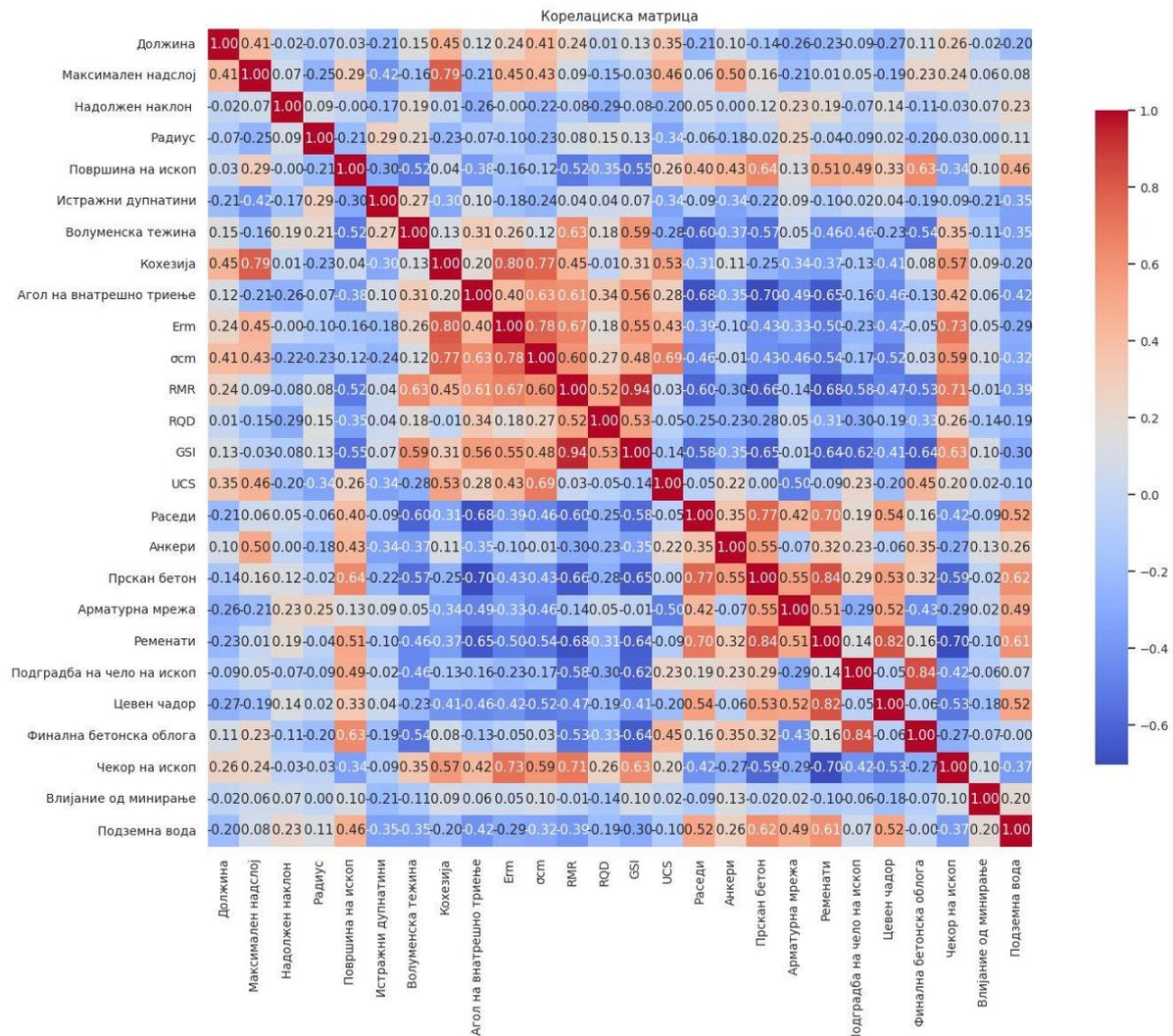


Слика 6.2 Хистограми на распределба на податоциите

Хистограмите (Слика 6.2) прикажуваат дистрибуција на параметри. Од нив може да се забележи дека:

- Геометриските податоци имаат широка распределба, односно има доста различни геометриски услови кај сегментите што е очекувано;
- Геотехничките податоци имаат различни облици на распределба (нормални и асиметрични) што индицира нестабилност по локации (сегменти или цели тунели);
- Податоците за подградбата имаат варијација што може да се поврзе со различни геолошки услови;
- Податоците за технологијата на градба имаат специфични вредности кои се ограничени на број и може да се групираат.

Направена е корелациона матрица со целата база на податоци (Слика 6.3). Во (Табела 6.2) се прикажани парови на податоци со највисоки корелации (позитивни и негативни).



Слика 6.3 Корелациона матрица со сите влезни податоци

Табела 6.2 Парови на податоци со највисоки корелации

Прв податок	Втор податок	Корелација
RMR	GSI	0,944
Финална бетонска облога	Подградба на чело на ископ	0,843
Прскан бетон	Ременати	0,836
Цевен чадор	Ременати	0,822
Кохезија	Erm	0,802
	Максимален надслој	0,789
σcm	Erm	0,776
	Кохезија	0,770
Прскан бетон	Раседи	0,767
Чекор на ископ	Erm	0,726
	RMR	0,706

Агол на внатрешно триење	Прскан бетон	0,703
Ременати	Чекор на ископ	0,700
	Раседи	0,699
σ_{cm}	UCS	0,688
Ременати	RMR	0,680
Раседи	Агол на внатрешно триење	0,680
E_{gm}	RMR	0,665
Прскан бетон	RMR	0,659
Агол на внатрешно триење	Ременати	0,650

Може да се забележи дека иако повеќето корелации имаат логика, се јавуваат и одредени податоци кои не соодејствуваат, како финална бетонска облога со подграба на чело на ископ, кохезија со надслој, агол на внатрешно триење со прскан бетон и ременати и др. Ова е елементарна анализа која ги зема во предвид само нумеричките вредности и нивните распределби и тенденции без предзнаење или дефинирани гранични вредности, па затоа не дава соодветна слика на реалните услови.

Истражена е можноста за дефинирање на тежински коефициенти (w_i) и веројатности на појава (P_f) на влезните податоци. Прво се направени анализи на тежински коефициенти според четири техники (PCA-Principal Component Analysis, стандардна девијација, опсег и варијанса) без дефиниран ризик и една метода со корелација со претходно дефиниран ризик. Со PCA и корелација со ризик се добиваат логични тежини, додека кај останатите три методи има голема несоодветност во распределбата (Табела 6.3).

Табела 6.3 Тежински коефициенти (w_i) според различни методи

Податок	PCA	Стандардна девијација	Опсег	Варијанса	Корелација со ризик
Должина	0,009	0,033	0,056	0,003	0,019
Максимален надслој	0,001	0,024	0,018	0,002	0,028
Надолжен наклон	0,014	0,002	0,001	0,000	0,007
Радиус	0,004	0,089	0,050	0,022	0,003
Површина на ископ	0,025	0,003	0,004	0,000	0,043
Истражни дупнатини	0,008	0,000	0,000	0,000	0,025
Волуменска тежина	0,052	0,001	0,000	0,000	0,060
Кохезија	0,024	0,075	0,079	0,016	0,022
Агол на внатрешно триење	0,054	0,003	0,002	0,000	0,072
E_{gm}	0,030	0,566	0,654	0,895	0,035
σ_{cm}	0,045	0,001	0,001	0,000	0,042
RMR	0,073	0,005	0,003	0,000	0,055
RQD	0,033	0,007	0,005	0,000	0,023
GSI	0,060	0,004	0,003	0,000	0,053
UCS	0,005	0,004	0,004	0,000	0,003
Раседи	0,113	0,000	0,000	0,000	0,090
Анкери	0,019	0,010	0,011	0,000	0,058
Прскан бетон	0,060	0,001	0,001	0,000	0,075
Арматурна мрежа	0,027	0,019	0,017	0,001	0,037
Ременати	0,085	0,147	0,087	0,060	0,062
Подградба на чело на ископ	0,036	0,001	0,000	0,000	0,020

Цевен чадор	0,074	0,005	0,003	0,000	0,042
Финална бетонска облога	0,031	0,001	0,001	0,000	0,016
Чекор на ископ	0,058	0,000	0,000	0,000	0,034
Влијание од минирање	0,005	0,000	0,000	0,000	0,010
Подземна вода	0,054	0,000	0,000	0,000	0,067

Потоа е направена анализа на веројатности на појава (Stille, 2017) со цел да се дефинираат одредени вредности кои би се користеле во моделите за процена на ризици. Преку оваа анализа базирана на статистика, веројатноста на појава на несакан настан или параметар е дефинирана преку променлива на однесување (P) и променлива која ја опишува границата на прифатливо однесување (A). Овој принцип е сличен како проектирањето според гранични состојби. Функцијата на сигурност или граничната функција (SM), а потоа веројатноста на појава (Pf) се пресметуваат на следниот начин:

$$SM = A - P \quad (6.1)$$

$$\beta = \frac{SM}{\sigma} \quad (6.2)$$

$$Pf = 1 - \Phi(\beta) \quad (6.3)$$

SM – функција на сигурност (гранична функција);

A – граница (праг) на прифатливост;

P – променлива на однесување (состојба) – реална или очекувана вредност;

σ – стандардна девијација (покажува колку има варијација во податоците);

β – индекс на сигурност или веродостојност – колку „сигма“ сме далеку од границата;

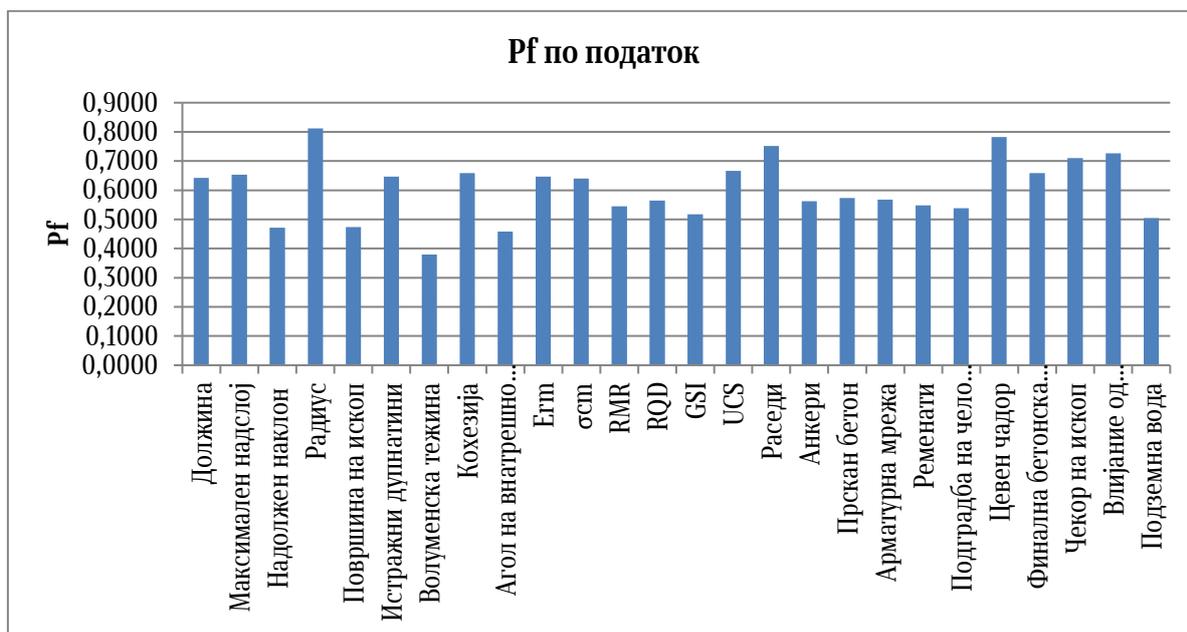
$\Phi(\beta)$ – кумулативна функција на нормална распределба;

Pf – веројатност да се надмине границата на прифатливост.

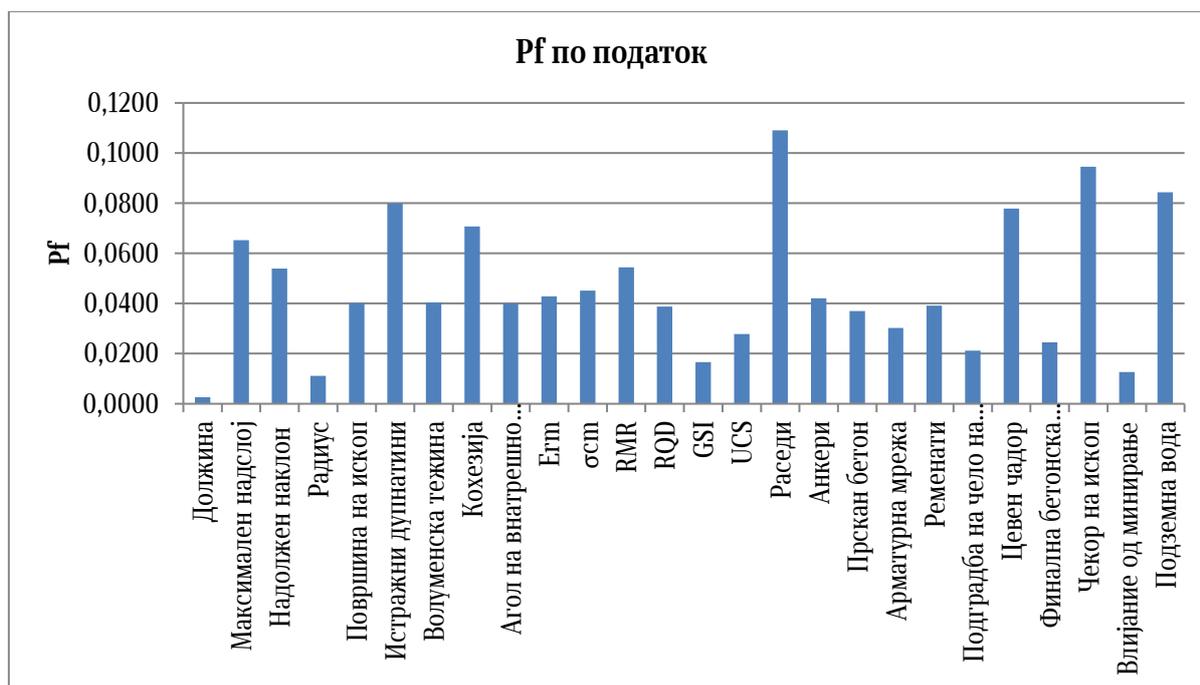
Пресметаната веројатност е резултат на нивото на знаење во времето на процената. Нивото може да се намали со понатамошни информации откриени за време на напредокот на проектот. Вакви веројатности се пресметани за секој влезен податок посебно, како и за сите податоци заедно како глобална веројатност.

При пресметка кај секој податок посебно границата на прифатливост (A) е дефинирана како медијана, а променливата на однесување (P) е средна вредност на множеството (Слика 6.4). Најголеми веројатности ($Pf > 0,70$) имаат вредностите чија медијана е нула, а тоа се радиус, цевен чадор, раседи и влијание од минирање. Логиката е дека, најголем број од овие вредности се нула, но сепак голема е веројатноста за надминување на овој праг (граница), што е особено критично кај раседите и влијанието од минирање. Покрај тоа анализирани се податоците при високи (критични) граници на прифатливост што доведува до ниски, но сепак важни веројатности (Слика 6.5). Кај ваквото сценарио, највисоки веројатности ($Pf > 0,07$) достигнуваат истражни дупнатини, кохезија, раседи, цевен чадор, чекор на ископ и подземна вода. И кај двете сценарија,

веројатностите зависат од тоа дали податоците (параметрите) се позитивно или негативно насочени.



Слика 6.4 Веројатносии на појава при гранична вредносии дефинирана како медијана



Слика 6.5 Веројатносии на појава при критични гранични вредносии

Логиката околу позитивно или негативно насочени параметри е следната: зголемувањето на вредностите кај некои податоци доведуваат до зголемување на ризикот (позитивно насочени), а кај останатите зголемувањето доведува до намалување на ризикот (негативно насочени). Во однос на веројатноста на појава кај позитивните насочени параметри претставува шанса да се премине во понебезедна (критична) граница и обратно кај негативно насочените параметри во побезедна граница. Притоа при различни

сценарија и модели, може истите параметри да имаат различни насоки во однос на ризикот.

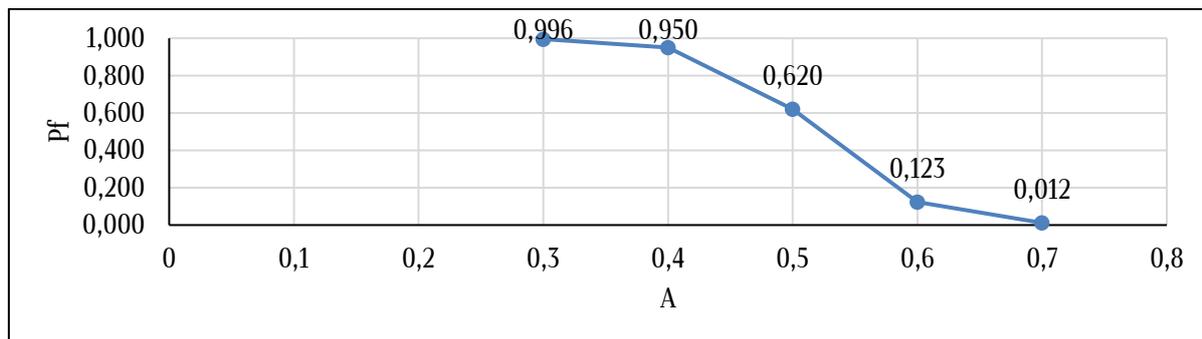
За пресметка на глобална веројатноста на појава користени се насоки (d_i) на параметрите, каде позитивната насока е означена со 1, а негативната со -1 и применети се модифицирани и конвертирани тежински коефициенти (w_i) со скала од 0-5, каде вредноста 1 е стандардно значење, >1 има зголемено значење, <1 е намалено значење и 0 значи дека нема влијание (Табела 6.4).

Табела 6.4 Тежински коефициенти и насоки на параметрите за пресметка на глобална веројатност на појава

Податок	Тежина (w_i)	Насока (d_i)
Должина	1	1
Максимален надслој	1	1
Надолжен наклон	0,2	1
Радиус	0,2	1
Површина на ископ	1	1
Истражни дупнатини	3	-1
Волуменска тежина	0,5	1
Кохезија	0,5	-1
Агол на внатрешно триење	0,5	-1
E_{tm}	1,5	-1
σ_{cm}	2	-1
RMR	3,2	-1
RQD	1,5	-1
GSI	1,5	-1
UCS	1,5	-1
Раседи	5	1
Анкери	1	-1
Прскан бетон	1	-1
Арматурна мрежа	1	-1
Ременати	2	-1
Подградба на чело на ископ	1	-1
Цевен чадор	3,3	-1
Финална бетонска облога	0,2	-1
Чекор на ископ	2,7	1
Влијание од минирање	2,5	1
Подземна вода	3	1

При пресметка на глобалната веројатност на појава, сите параметри се нормализираат (0-1), се применуваат тежински коефициенти и насоки, при што добиваме композитен индекс (променлива на однесување P) и функција на сигурност (SM) за секој сегмент при глобална граница на прифатливост (A). Потоа, се пресметува индексот на сигурност (β) како однос од средната вредност и стандардната девијација на функцијата на сигурност, за на крај да се добие веројатноста. За оваа анализа пресметката е започната со глобална граница на прифатливост од $A=0,5$ со што е добиена глобална веројатност $P_f=0,62$. Ова претставува појава од 62% да се надмине границата од 0,5. Покрај тоа

направени се неколку комбинации со промена на глобалната граница $A=0,3$ до $A=0,7$ при што има логично опаѓање на веројатноста (Слика 6.6).



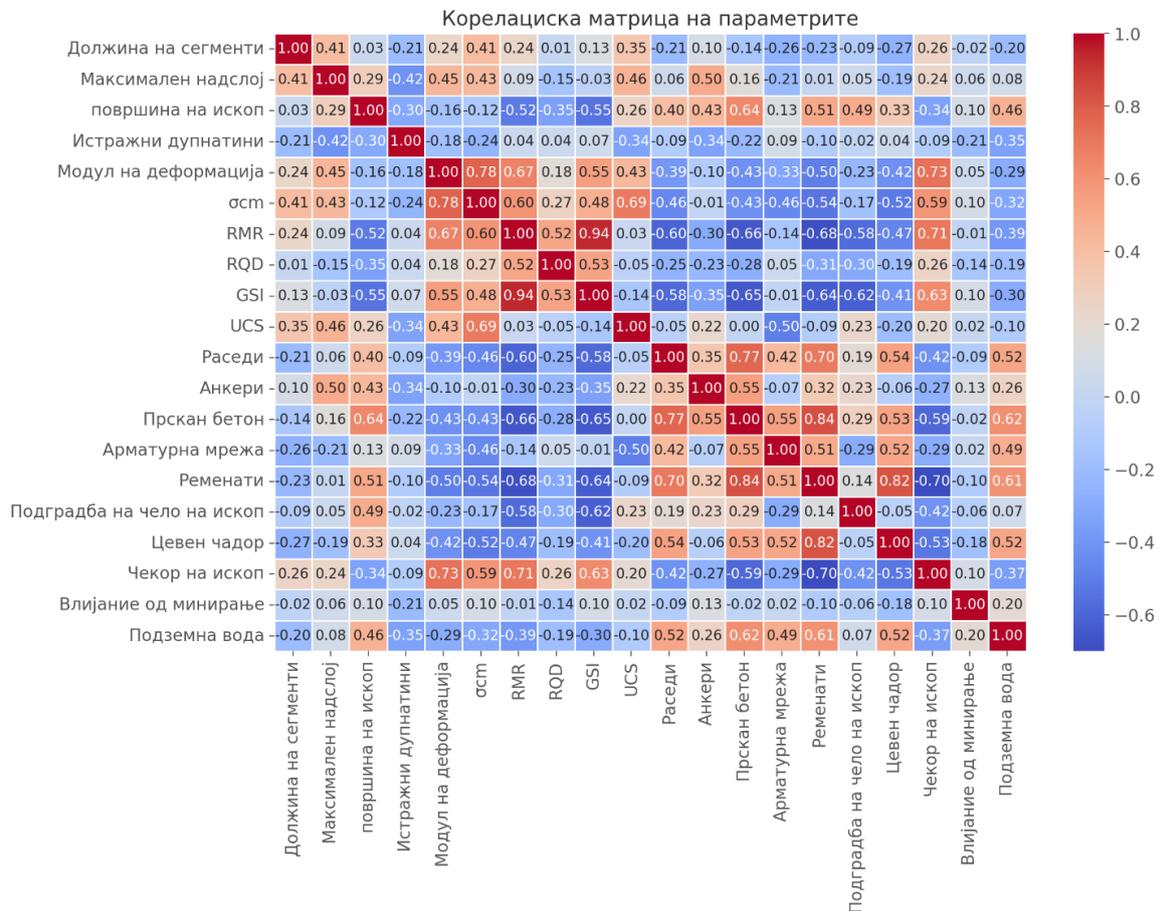
Слика 6.6 Однос помеѓу глобалната граница на прифатливост и веројатноста на појава

Во однос на глобалното влијание на податоците кај сите сегменти направен е дијаграм на осетливост каде се гледа корелацијата со композитниот индекс (Слика 6.7). Овој дијаграм покажува како секој параметар влијае на вкупната оцена, при што може да се забележи дека раседите, аголот на внатрешно триење, подземната вода, RMR и прсканиот бетон имаа највисока корелација. Исто така, спроведена е анализа со различни тежински коефициенти за секој параметар, но и покрај различни комбинации на тежини одредени податоци имаат многу високи (нереални) корелации.



Слика 6.7 Корелација помеѓу влезните податоци и композитниот индекс P

По изработка на неколку корелациони матрици, пресметки за веројатност на појава и тестирање на повеќе модели, отстранети се дел од податоците (надолжен наклон, радиус, волуменска тежина, кохезија, агол на внатрешно триење и финалната бетонска облога), бидејќи истите покажуваат многу мали/големи или несоодветни корелации, а во одредни модели предизвикуваат аномалии и грешки. Со ова бројот на влезни податоци во моделите изнесува 20.



Слика 6.8 Корелациска матрица со редуциран број на влезни податоци

Според корелационата матрица (Слика 6.8) може да се видат корелации кои соодветстуваат со реалните состојби кои се јавуваат кај тунелите:

- RMR, RQD и GSI се високо корелирани, што е очекувано бидејќи сите прикажуваат квалитет на карпестиот масив;
- Модулот на деформација има умерена корелација со RMR и RQD, што сугерира дека послаби карпи имаат пониска крутост;
- Веројатност на појава на раседи има негативна корелација со RMR и RQD, што укажува на тоа дека раседните зони најчесто имаат послаб карпест масив;
- Анкерите, прсканиот бетон и арматурната мрежа имаат позитивна корелација со пониски RMR и RQD вредности, што значи дека на послаби карпи се применува повеќе подградба;

- Ременатите и цевниот чадор покажуваат силна врска со критичните геолошки услови;
- Чекорот на ископ е негативно корелиран со слабите карпи, што сугерира дека во послаби услови се применува пократок чекор за зголемена стабилност;
- Подземната вода има негативно влијание врз RMR и поврзана е со зголемена употреба на подградба.

6.1.2 Анализа со дрво на грешки и настани

Како втор дел од прелиминарната анализа применета е комбинацијата на дрвото на грешки и настани (FTA&ETA) за одредени покарактеристични тунели, односно тунели кои имаат критични вредности во позитивен и негативен аспект на ризик. Анализата се однесува на цели тунели (без поделба по сегменти) или група на тунели со слични карактеристики. За секој тунел или група се направени посебни дрва на грешки за хазарди и дрва на настани за ризици (прилог 10.2). Во однос на ризиците од интерес се оние со тешки и сериозни последици. Целта на оваа прелиминарна анализа е да истражи дополнително влијанието на влезните параметри во однос на процената на хазарди и ризици, преку еден поразличен пристап од основите статистички и корелациони анализи.

Користена е целата база на податоци, при што преку дрвото на грешки направено е разгранување од главниот (примарен) настан, односно хазард во четирите основни групи на податоци (геометрија, геологија, подградба и технологија), а потоа во други подгрупи, па се до основните настани кои се всушност влезните податоци. Кај геометријата имаме две подгрупи: траса (надолжен наклон и радиус) и геометриски карактеристики (површина на ископ, максимален надслој и геологија). Кај геологија има исто така две подгрупи: истражни дупнатини и раседи (формирани од истите) и параметри на карпест масив каде волуменска тежина, кохезија и агол на внатрешно триење се еден основен настан, а исто така, и глобалната јакост и модулот на деформација, додека останатите податоци (RMR, RQD, GSI, UCS) се како посебни настани. Во групите подградба и технологија секој податок е основен настан.

Проценети се веројатностите за поплава и колапс (главни настани), кои претставуваат едни од најкритичните хазарди при изградба на тунелите. За секој основен настан во дрвото на грешки се доделени веројатности кои се базираат на самите вредности на податоците (Табела 4.2). Потоа според логиката на дрвото на грешки, добиена е веројатноста на појава на главниот настан (Слика 6.10). Со добиените веројатности хазардите се претставени како иницијални настани во дрвото на настани, каде што се дефинирани три фактори (мерки) на влијание врз иницијалниот настан кои со нивниот успех/неуспех влијаат на вкупно осум последици (Слика 6.11). Притоа најкритично сценарио (со тешка последица) е неуспехот на сите три мерки (најгорната гранка од дрвото), а второ критично (со сериозна последица) е успехот на само една мерка. Успехот/неуспехот на мерките е дефиниран со 90/10% (0,9/0,1). Со употребата на логнормалната дистрибуција и Монте Карло симулација со 1000 примероци, добиени се резултати во форма на кумулативна распределба на веројатност (Слика 6.12). Истиот концепт со доделување на стандардни девијации на превентивните мерки и иницијалниот настан, спроведен е во дрвото на настани.

За сите анализирани тунели се добиени посебно веројатности на појава за поплава и колапс (Табела 6.5). Се забележува дека колапсот има поголема веројатност од поплавата, а кај одредени тунели се јавува многу голема веројатност на појава на хазард. Во однос на ризикот, веројатностите за настанување хазард со тешки последици се многу мали, но со сериозни последици има и мали веројатности.

Табела 6.5 Веројатности на појава на хазард и ризици добиени преку дрвојто на грешки и настани

Делница	Тунел број	Хазард (FTA)		Ризик (ETA)			
		Поплава	Колапс	Поплава		Колапс	
				Сериозна	Тешка	Сериозна	Тешка
I	3 и 4	0,032	0,063	0,000284	3,15E-05	0,000568	6,31E-05
	15	0,102	0,482	0,000918	0,000102	0,004338	0,000482
II	1,2,3 и 4	0,044	0,087	0,000397	4,41E-05	0,000781	8,68E-05
	19 и 20	0,232	0,543	0,002088	0,000232	0,004887	0,000543
III	2,3 и 4	0,048	0,080	0,000432	4,80E-05	0,000720	8,00E-05
	6	0,210	0,586	0,001890	0,000210	0,005274	0,000586

Влијанието на основните групи и влезните параметри е различно во зависност од самите тунели и хазарди (Табела 6.6). Забележително е малото (занемарливо) влијание на одредени податоци (надолжен наклон, радиус, волуменска тежина, кохезија, агол на внатрешно триење и финална бетонска облога), што веќе е потврдено при основните анализи.

Табела 6.6 Просечно учество на основните групи и највлијателни фактори

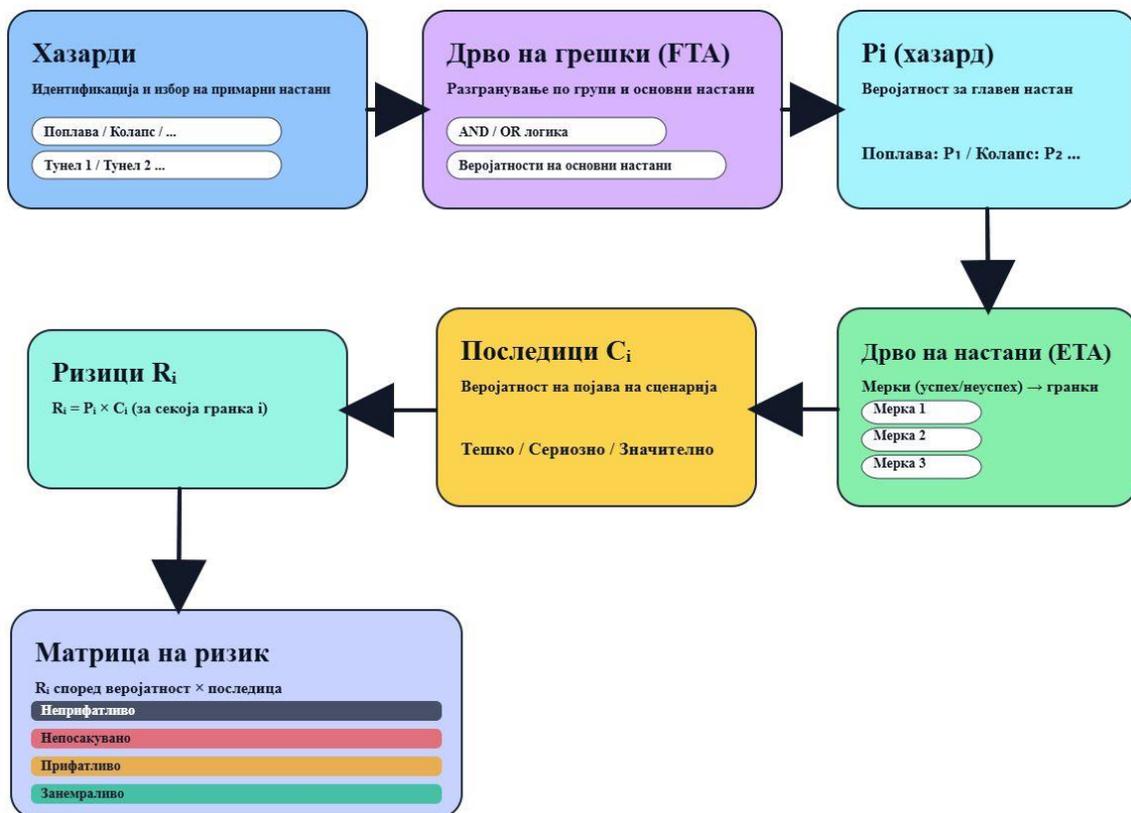
Хазард	Просечно учество на основните групи во хазардот (%)			
	Геометрија	Геологија	Подградба	Технологија
Поплава	12,64	47,74	11,52	31,79
Колапс	14,01	56,23	29,36	15,25
Средна вредност	13,32	51,98	20,44	23,52
Број	Највлијателни податоци во основните групи			
1	Надслој	Раседи	Цевен чадор	Минирање
2	Должина	Истражни дупнатини	Подградба на чело на ископ	Подземна вода
3	Површина на ископ	RMR	Анкери	Чекор на ископ

Табела 6.7 Резултати од матрица на ризик за анализа со дрво на грешки и настани

Матрица	Последица				
	Катастрофална	Тешка	Сериозна	Значителна	Занемарлива
Многу висока	Неприфатливо	Неприфа.	Неприфа.	Непосак.	Непосак.
Висока	Неприфатливо	Неприфа.	Непосак.	Непосак.	Прифатливо
Средна	Неприфатливо	Непосак.	Непосак.	Прифатливо	Прифатливо
Ниска	Непосакувано	Непосак.	Прифат.	Прифатливо	Занемарливо
Многу ниска	Непосакувано	Прифат.	Прифат.	Занемарливо	Занемарливо

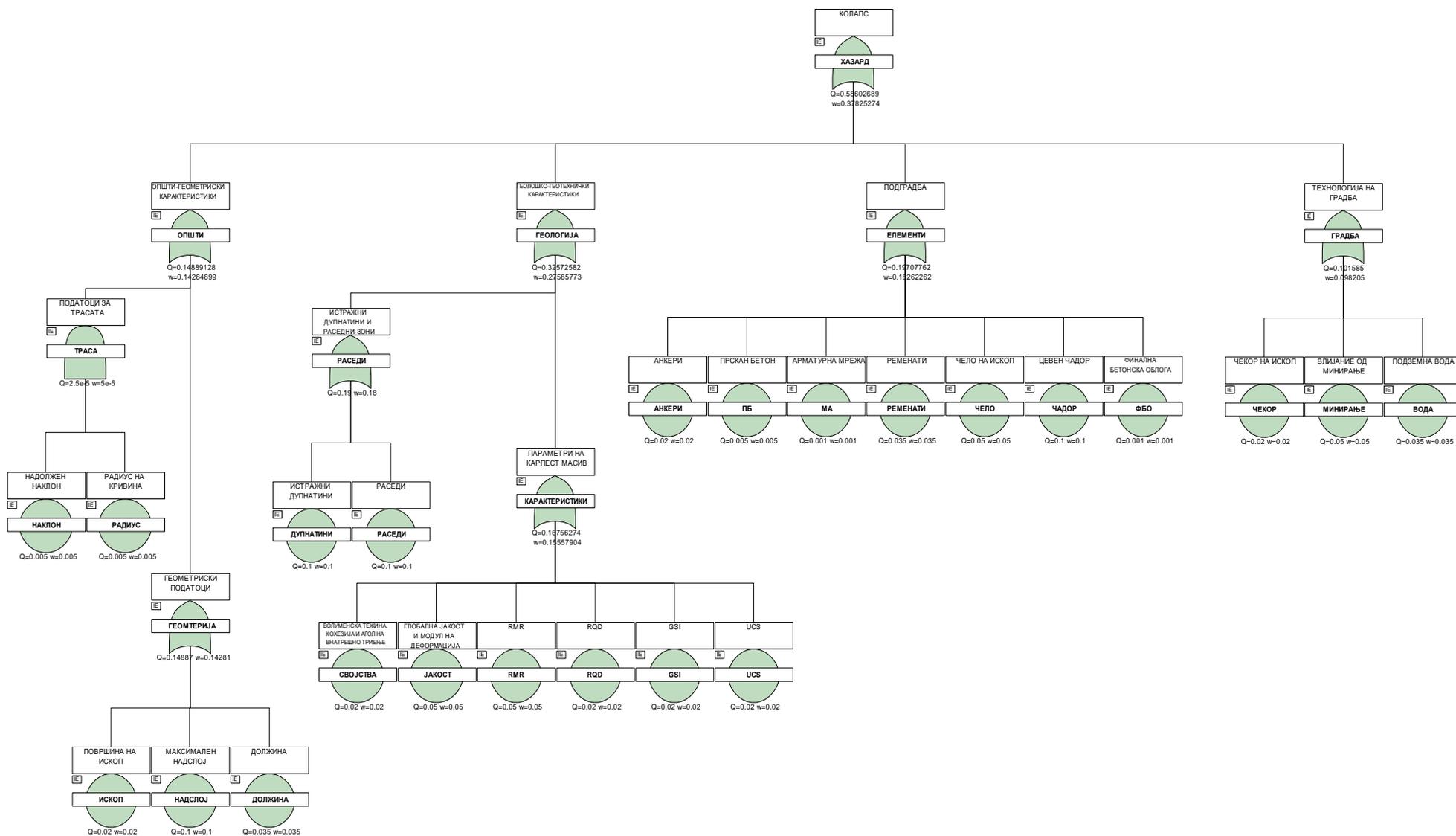
Според матрицата за ризик и добиените веројатности преку дрвото на грешки и настани, тунелите од Коридорот 8 спаѓаат во прифатливи нивоа на ризик (Табела 6.7). Но, кај ваков тип на хазарди има можност при нивно случување да дојде до катастрофални последици, а при такви сценарија и малите веројатности доведуваат до непосакувани нивоа. Друго сценарио кое е најкритично, а теоретски најневозможно е случување на хазард без притоа да имаат влијание безбедносните (превентивните) мерки. Во тој случај веројатноста на хазардот од дрвото на грешки претставува и веројатност на ризик, а кај резултатите од анализираните тунели ќе доведе до неприфатливо ниво на ризик.

Оваа комбинација на дрва (Слика 6.9) дава резултати кои потекнуваат од веројатности (групи во кои индиректно се користат вредностите за секој податок) и поголемиот дел од податоците имаат еднакво влијание, односно варијација се јавува само кај највлијателните фактори. Затоа, ваквиот концепт е применет во прелиминарна анализа со цел да се елиминираат дел од податоците, да се проценат првични веројатности и влијателни параметри и да може да се добие врска помеѓу влезните податоци, основните главни групи, подгрупи, хазарди и ризици.



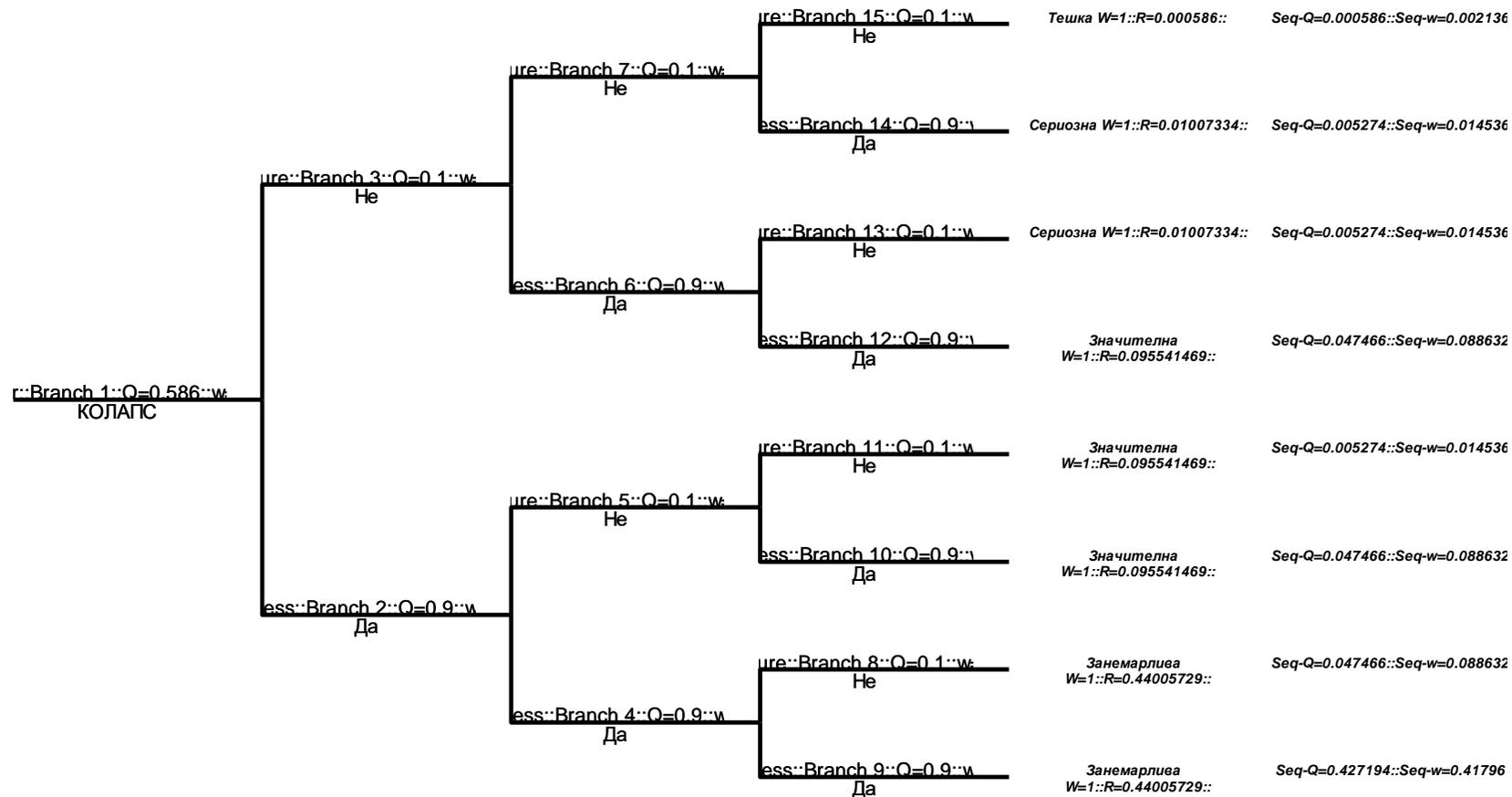
Слика 6.9 Дијаграм со концепцијата за разработка на анализата на дрва

На следните три слики прикажани се дрвото на грешки, дрвото на настани и кумулативната распределба на веројатноста за тунелот број 6 од третата делница кој претставува најдолг тунел од целата база на податоци. Сите дрва на грешки и настани се направени со софтверот „ITEM ToolKit“, кој претставува пакет со голем број на модели од областа на ризиците и безбедноста.

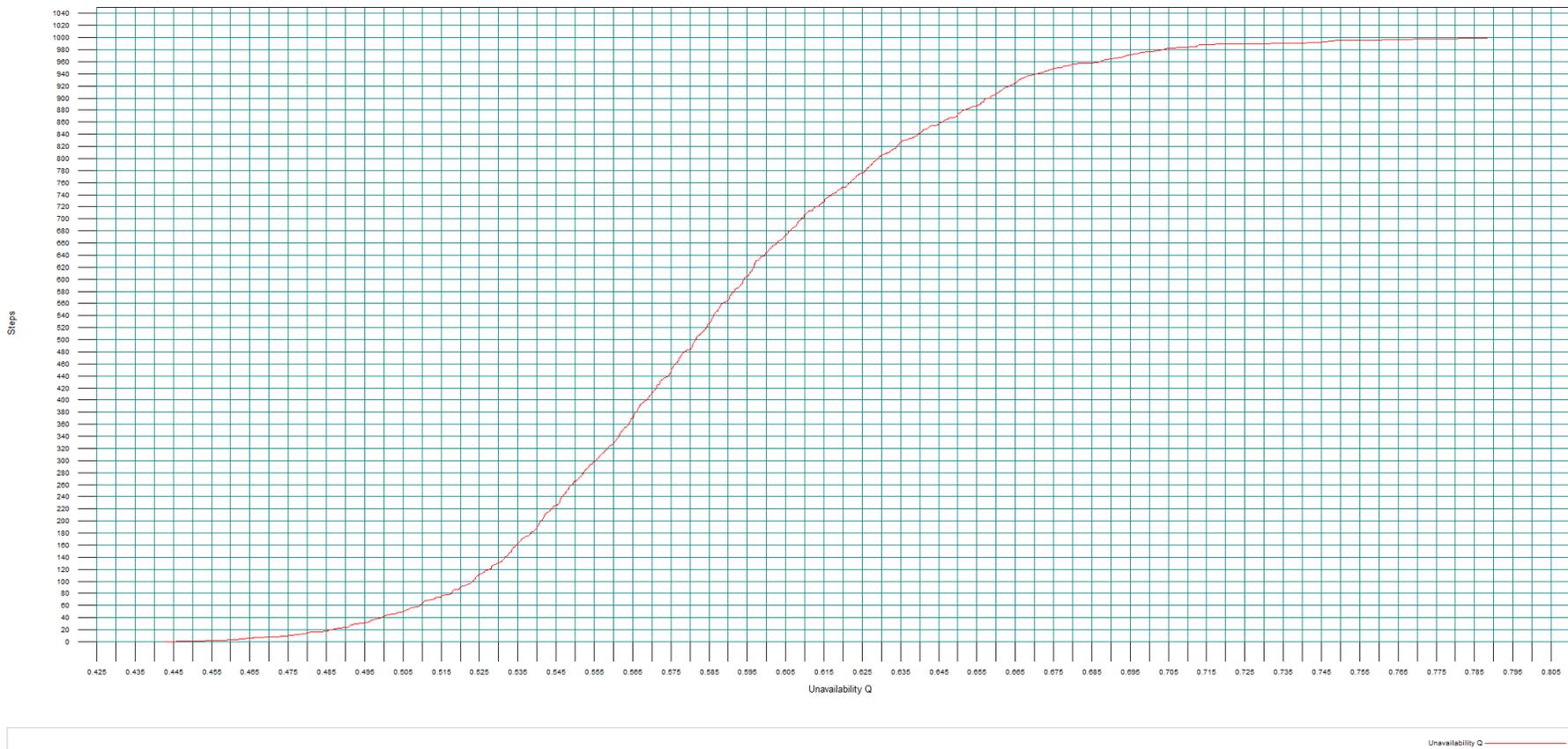


Слика 6.10 Дрво на грешки за колајс кај тунел 6 од делница III

Хазард Иницијален (врвен) настан	Инјектирање	Претходна заштита	Модификација на ископ	Consequence	Result
-------------------------------------	-------------	-------------------	-----------------------	-------------	--------



Слика 6.11 Дрво на настанувања за колапс кај тунел 6 од делница III



Слика 6.12 График од њробабилсѡичкаѡа анализа кај дрвоѡо на грешки за колаѡс кај ѡунел 6 од делница III

6.2 Модели без претходно проценети ризици

Кај првиот концепт разгледувани се податоците без целна променлива, односно без дефинирана веројатност на појава на ризици (хазарди). Направена е кластер анализа за да се одредат групи на тунелски сегменти со слични карактеристики. Применети се три методи-алгоритми за кластеризација (I-Ward, II-K-Means & III-Gaussian Mixture Model-GMM) и добиени се различен број на оптимални кластери. Првично е истражувано со автоматски број на кластери, односно одредување на бројот според коефициент (silhouette score), а потоа се предложени и одредени промени. Кластерите се нумерирани од 1 до 6 (4), каде што 1 претставува највисок, а 6 (4) најнизок ризик. Индикатори за податоците се средни вредности во рамки на таа категорија, односно кластер (Табела 6.8). Освен кај одредени податоци како должина и надслој (кои се така дефинирани од реалните услови), кластерите даваат добра логика проследена со слаба карпеста маса, многу подградба и високи веројатности на појава на несакани појави како најкритични и обратно од тоа како најнекритични сегменти.

Табела 6.8 Кластеризација на податоците според различни методи

Мет.	Метод 1. Ward				Метод 2. K-Means				Метод 3. GMM					
Клас.	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Дол.	30	70	62	272	29	66	55	189	20	30	42	27	158	81
Надс.	71	72	48	277	69	75	41	174	309	70	47	18	126	62
Повр.	75	80	61	73	76	80	61	68	87	76	77	62	70	58
Истр аж.	0,00 37	0,00 43	0,00 53	0,00 12	0,00 38	0,00 39	0,00 58	0,00 20	0,00 12	0,00 38	0,00 37	0,0 077	0,00 24	0,00 52
Егн	254	721	180 9	569 1	258	657	1483	4714	800	252	676	744	2475	340 3
σ _{cm}	0,5	2,3	3,5	9,4	0,5	2,3	2,6	9,1	2,0	0,5	2,4	1,7	5,3	5,0
RMR	21,2	17,4	43,0	49,5	21,5	16,0	42,1	49,5	10,0	21,2	14,7	33,6	41,8	56,2
RQD	33,5	26,2	47,1	28,8	33,8	25,9	43,6	48,9	14,6	33,5	26,0	37,7	33,6	66,3
GSI	17,0	10,5	37,8	31,7	17,3	9,2	37,0	37,8	5,0	17,0	8,0	29,1	35,3	46,6
UCS	26,8	38,6	26,9	61,8	26,8	39,2	23,5	54,4	48,0	26,8	40,4	21,7	37,6	31,5
Рас.	0,87	0,38	0,07	0,04	0,84	0,38	0,08	0,02	1,00	0,87	0,35	0,12	0,02	0,05
Анк.	39	53	16	44	38	54	15	34	222	39	33	6	41	10
ПБ	10,2	6,9	3,7	4,6	10,2	6,9	3,7	4,0	12,0	10,3	6,4	3,8	4,5	3,0
АМ	167	10	70	0	168	4	73	22	0	169	0	84	49	52
Рем.	1419	661	294	232	1395	667	315	185	109 6	1418	624	519	292	52
Чело	1,1	5,3	0,8	1,7	1,2	5,5	1,0	0,9	7,4	1,2	5,6	1,7	0,8	0,6
Чад.	40,6	10,2	7,5	0,0	40,3	10,2	8,4	0,0	0,0	40,6	9,5	21,1	0,0	0,8
Чек.	0,83	0,87	1,97	2,83	0,84	0,83	1,85	2,78	0,75	0,83	0,81	1,10	2,13	2,93
Мин.	0,07	0,09	0,14	0,00	0,07	0,10	0,12	0,12	0,28	0,07	0,09	0,05	0,27	0,00
ПВ	0,44	0,18	0,14	0,02	0,45	0,19	0,14	0,08	0,43	0,44	0,17	0,14	0,17	0,05

За секој сегмент во базата на податоци се доделени кластери (Табела 6.9) земајќи ги во предвид индикаторите, што всушност дава модел кој може да проценува ризици според различни методи.

Табела 6.9 Вкупен број на кластери и процентуално учество на сегментите

Методи	I. Ward	II. K-Means	III. GMM
Вкупен број на кластери	4	4	6
Број на сегменти (вкупно 341)			
Кластер 1 (K1)	69 (20%)	72 (21%)	6 (2%)
Кластер 2 (K2)	63 (18%)	59 (17%)	70 (20%)
Кластер 3 (K3)	186 (55%)	160 (47%)	46 (13%)
Кластер 4 (K4)	23 (7%)	50 (15%)	72 (21%)
Кластер 5 (K5)	/	/	83 (24%)
Кластер 6 (K6)	/	/	64 (20%)

Кај првите две методи имаме 4 кластери и генерално слична распределба на сегментите, каде што првиот кластер претставува сегменти со висок ризик, односно висока веројатност на појава на раседи ($>0,80$), слаба карпеста маса, интензивна употреба на подградба и значително присуство на подземна вода ($>0,40$). Вториот кластер (среден ризик) се карактеризира со средни веројатности за појава на раседи ($<0,40$) и подземна вода ($<0,20$), слаба карпеста маса и интензивна употреба на подградба. Кај третиот кластер кој го претставува најголемиот дел од сегментите, имаме мала веројатност на појава на раседи ($<0,10$) и подземна вода ($<0,20$), средна карпеста маса и умерена подградба. Четвртиот кластер има најмала веројатност на појава на раседи ($<0,05$) и подземна вода ($<0,10$), добра карпеста маса и умерена подградба, но големи должини на сегменти и голем надслој. Третиот и четвртиот кластер се дефинирани со сегменти со низок ризик. Во третата метода, дефинирани се 6 кластери со поразлична распределба и појава на помал број на сегменти. Првиот кластер со најмал број на сегменти претставува највисок ризик, каде има сигурна веројатност на појава на раседи (1,00), многу слаба карпеста маса, интензивна подградба но без цевен чадор и значително влијание од минирање и подземна вода. Вториот и третиот кластер се слични со K1 и K2 од првите две методи, а четвртиот и петиот кластер со K3 и K4. Последниот кластер кај оваа метода претставува комбинација од многу мали веројатности на појава на раседи и подземна вода ($<0,10$), јака карпеста маса и слаба подградба со мала употреба на цевен чадор (Табела 6.10).

Табела 6.10 Главни карактеристики на кластерите според методите за кластеризација

Кл.	I-Ward и II-K-Means				III-GMM			
	Геом.	Геол.	Подгр.	Техн.	Геом.	Геол.	Подгр.	Техн.
K1	Многу кратки сегмент и со среден надслој	Слаба карпеста маса со голема веројатност за појава на раседи	Интензивна (голема) подградба со најголема употреба на цевен чадор	Најкраток чекор на ископ, мало влијание од минирање и значително од подземна вода	Многу кратки сегмент и со многу голем надслој	Многу слаба карпеста маса со сигурна веројатност за појава на раседи	Интензивна (голема) подградба, но без употреба на цевен чадор	Најкраток чекор на ископ, значително влијание од минирање и подземна вода

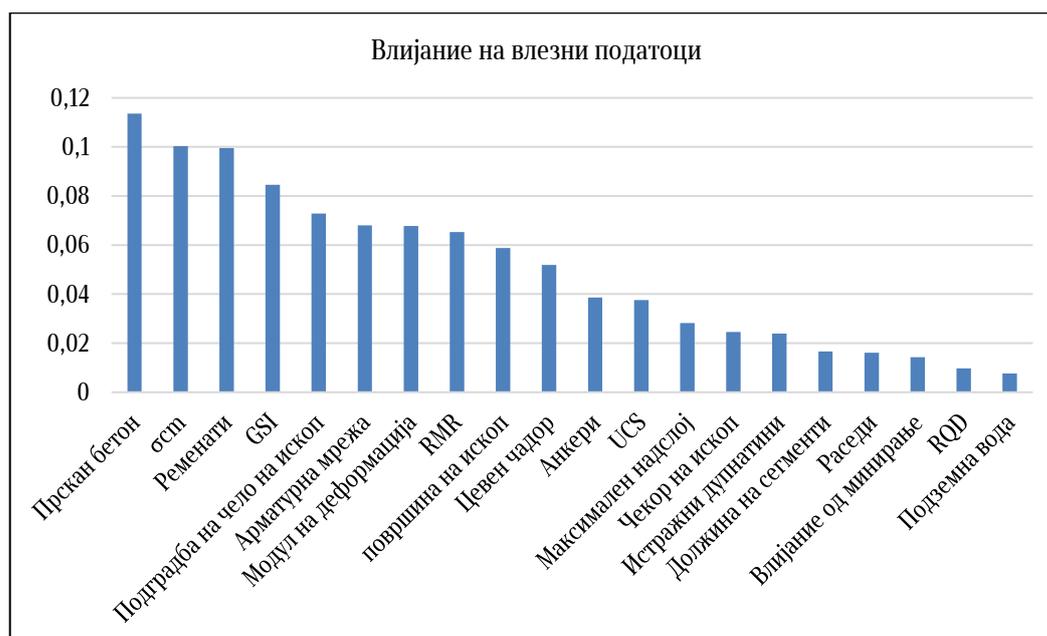
K2	Средно кратки сегмент и со среден надслој	Слаба карпеста маса со средна веројатност на појава на раседи	Интензивна (голема) подградба со средна употреба на цевен чадор	Многу краток чекор на ископ, мало влијание од минирање и средно од подземна вода	Многу кратки сегмент и со среден надслој	Слаба карпеста маса со голема веројатност за појава на раседи	Интензивна (голема) подградба со најголема употреба на цевен чадор	Најкраток чекор на ископ, мало влијание од минирање и значително од подземна вода
K3	Средно кратки сегмент и со мал надслој	Средна карпеста маса со мала веројатност на појава на раседи	Умерена (средна) подградба со средна употреба на цевен чадор	Средно краток чекор на ископ, мало влијание од минирање и средно од подземна вода	Средно кратки сегмент и со среден надслој	Слаба карпеста маса со средна веројатност на појава на раседи	Интензивна (голема) подградба со средна употреба на цевен чадор	Многу краток чекор на ископ, мало влијание од минирање и средно од подземна вода
K4	Долги сегмент и со голем надслој	Јака карпеста маса со многу мала веројатност на појава на раседи	Умерена (средна) подградба, но без употреба на цевен чадор	Долг чекор на ископ, мало влијание од минирање и подземна вода	Средно кратки сегмент и со многу мал надслој	Средна карпеста маса со мала веројатност на појава на раседи	Умерена (средна) подградба со голема употреба на цевен чадор	Краток чекор на ископ, мало влијание од минирање и средно од подземна вода
K5	/	/	/	/	Долги сегмент и со голем надслој	Средна карпеста маса со многу мала веројатност на појава на раседи	Умерена (средна) подградба, но без употреба на цевен чадор	Долг чекор на ископ, средно влијание од минирање и подземна вода
K6	/	/	/	/	Средно кратки сегмент и со среден надслој	Јака карпеста маса со многу мала веројатност на појава на раседи	Слаба (мала) подградба со мала употреба на цевен чадор	Долг чекор на ископ, многу мало влијание од минирање и подземна вода

Со вака оформени кластери, направени се три модели со машинско учење, односно 1-Random Forest, 2-XGBoost и 3-Neural Network (основна невронска мрежа), кои можат да предвидат кластери кај нови тунелски сегменти (Табела 6.11). Направени се повеќе анализи со различни промени во однос на самите параметри на моделите и влезните податоци (влијателност). Кај влезните податоци тестирано е стандарно или ненадгледувано влијание (каде сите податоци имаат исто влијание) и надгледувано влијание (каде податоците имаат претходно модифицирано влијание, односно различна тежина).

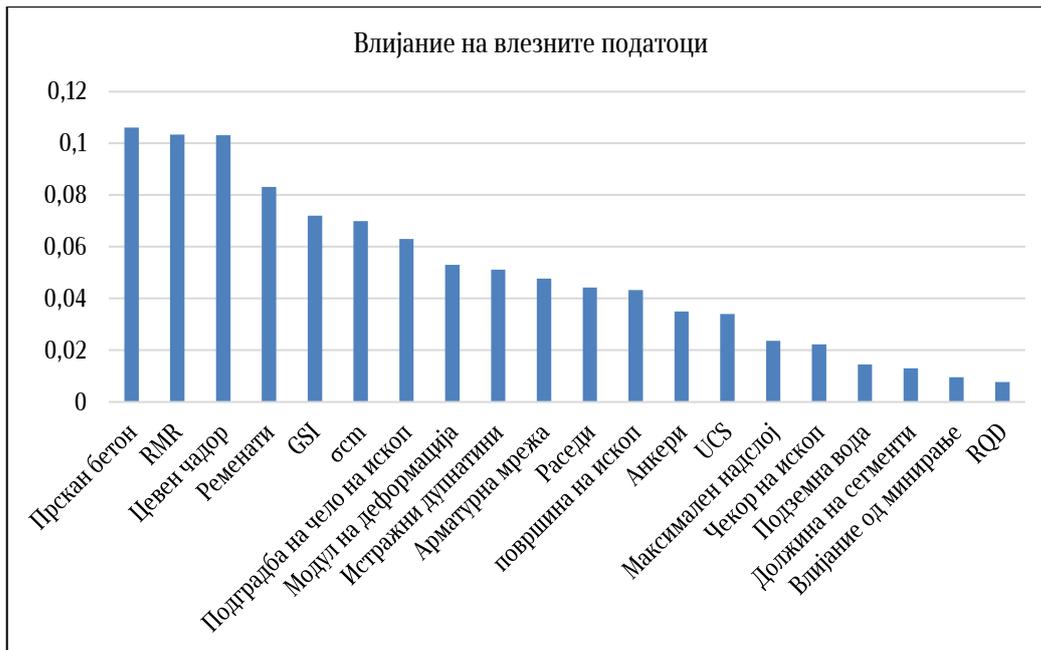
Табела 6.11 Процена на точноста при модели за предвидување според различни кластер методи со претходно модифицирано влијание

Метод	Модел	Точност
I. Ward	1-Random Forest	0,988
I. Ward	2-XGBoost	0,985
I. Ward	3-Neural Network	0,915
II. K-Means	1-Random Forest	0,988
II. K-Means	2-XGBoost	0,991
II. K-Means	3-Neural Network	0,930
III. GMM	1-Random Forest	0,962
III. GMM	2-XGBoost	0,980
III. GMM	3-Neural Network	0,950

Од трите машински модели најсоодветен при предвидување на кластери моделот 1-Random Forest дава голема точност и најсоодветна распределба на влијателни фактори кај сите три кластеризации (Слика 6.13 и Слика 6.14). Моделот 2-XGBoost дава најголема точност, но несоодветна распределба на влијанијата на влезните параметри, а невронските мрежи даваат најмала точност и распределба на влезни податоци.

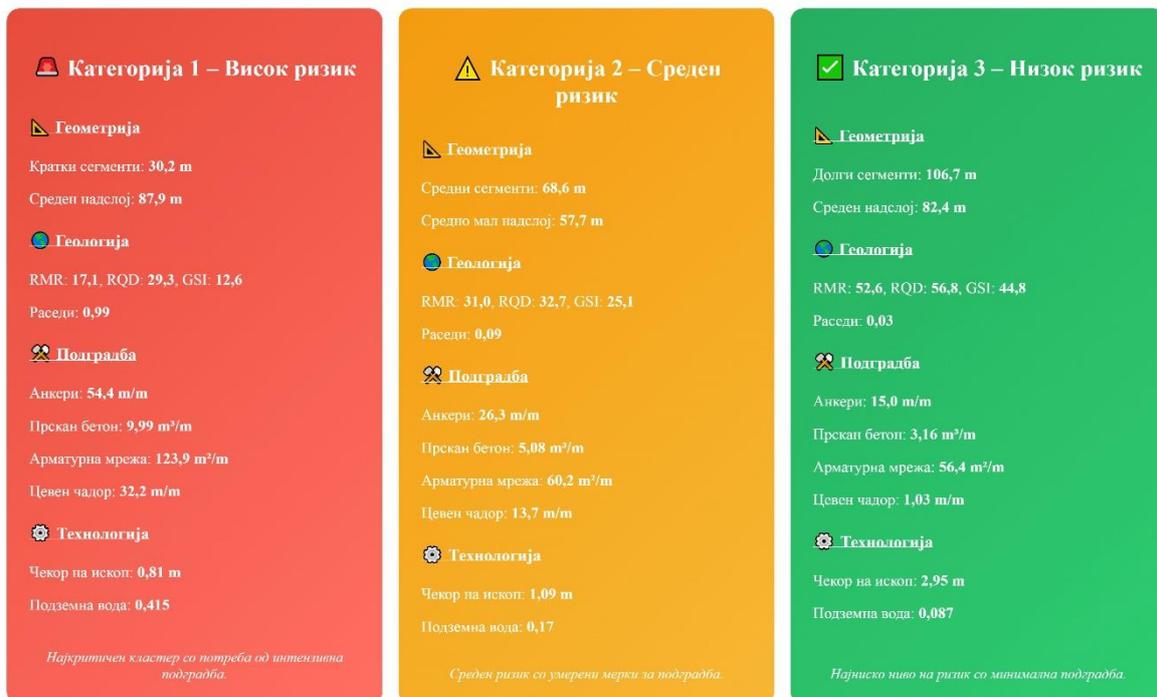


Слика 6.13 Просечно влијание на влезните податоци од припадните методи според модел 1 без претходна модификација на влијателноста



Слика 6.14 Просечно влијание на влезните податоци од илустрираните методи според модел 1 со итеративна модификација на влијателноста

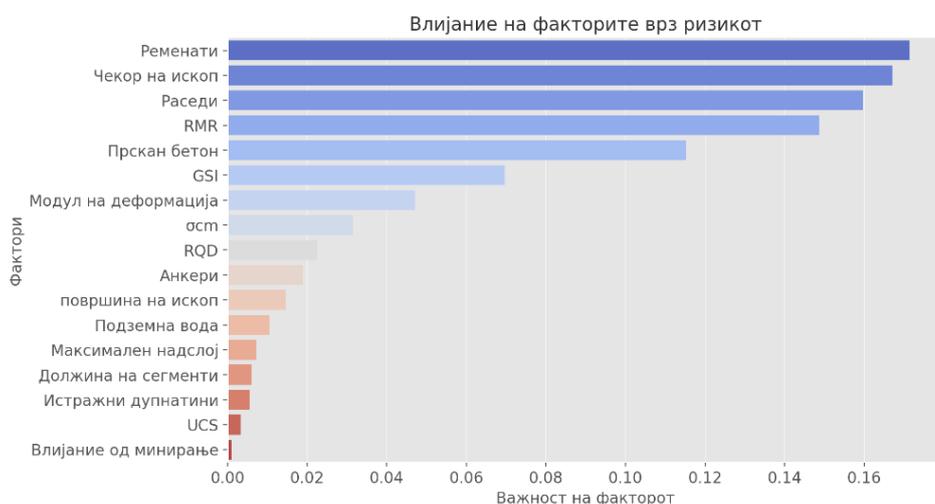
Земајќи ги во предвид кластер анализите од претходно, направена е уште една кластеризација со модификација. Тука е дефиниран фиксен број од три главни кластери, односно класификација на сегментите во три ризични категории. На (Слика 6.15) се претставени главните карактеристики кои ги дефинираат категориите, а при одредување на ризикот кај сегментите искористени се сите податоци.



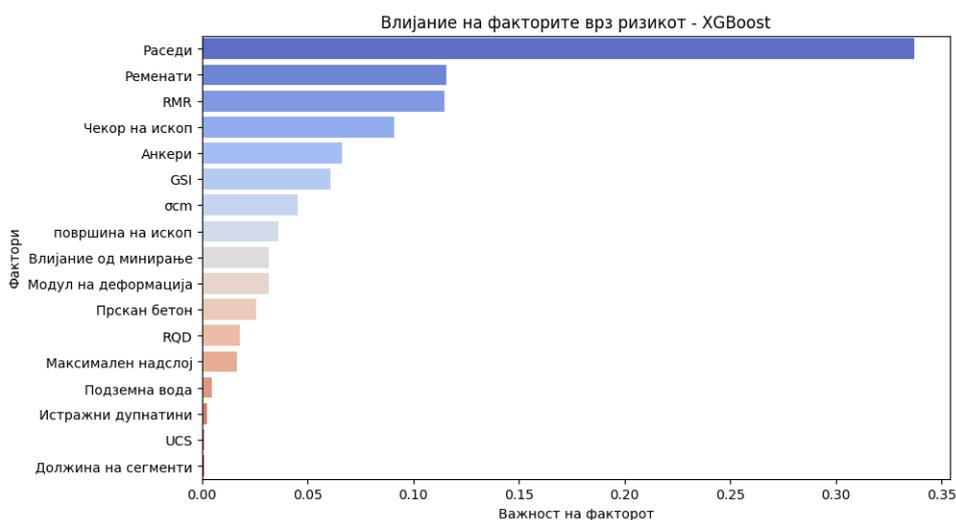
Слика 6.15 Класификација со фиксен број на кластери, односно три ризични категории

Овие кластери даваат поразлична прераспределба на влијание на факторите со доминација на гореспоменатите податоци.

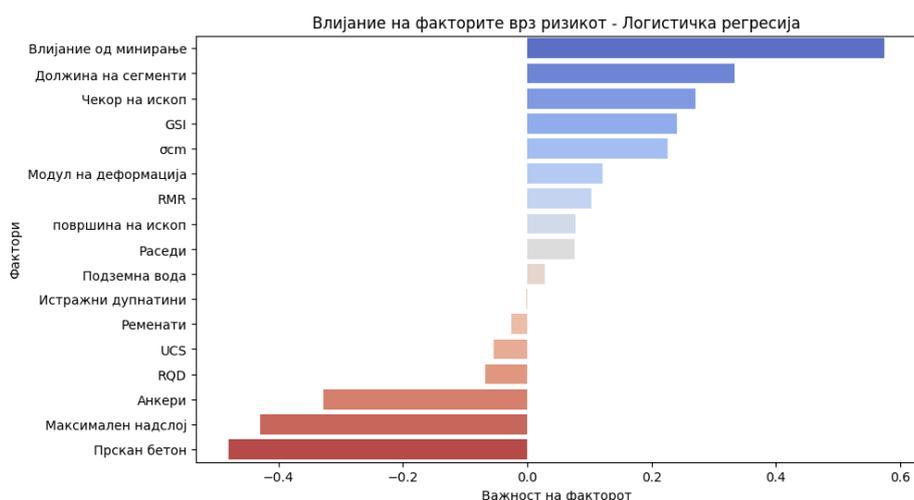
Со вака дефиниран пристап направени се 3 различни модели, при што првите два се исти како претходно (1-Random Forest и 2-XGBoost), а за третиот е истражена логистичка регресија со цел да се истражи поразличен пристап од невронските мрежи. Сите модели имаат голема точност ($> 0,95$), но различни влијателни параметри. Според точноста и влијанието на факторите (влезните параметри) моделот 1 е најдобар (Слика 6.16), па следуваат модел 2 (Слика 6.17) каде што има голема доминација на раседите и модел 3 (Слика 6.18) кој има најголеми нелогичности и најмала точност и покрај одредени модификации (хибридни модели). Првите два модели може да се користат кај секаков тип на сегменти, дури и со намален број на податоци, додека употребата на третиот модел е ограничена. Со предвидувањата просекот е 80 сегменти со висок ризик (23%), 157 со среден ризик (46%) и 104 со низок ризик (31%).



Слика 6.16 Влијателноста на факторите според модел 1 без претходно проценети ризици



Слика 6.17 Влијателноста на факторите според модел 2 без претходно проценети ризици



Слика 6.18 Влијателноста на факторите според модел 3 без претходно проценети ризици

Со оглед дека се анализираат кластери, машинските модели можат да предвидат со големи точности бидејќи учат од веќе дефинирани правила од кластеризацијата. Целта на овој дел од истражувањето се базира генерално на влијателни параметри кои може да се модифицираат (со тежини) или да се искористат и одредување на оптималниот број на кластери (ризици категории-групи) кои најдобро ги опишуваат реалните состојби.

6.3 Модели со претходно проценети ризици

Во вториот концепт прво се дефинирани различни граници, односно ризик како квантитативни вредности и ризик како квалитативни категории (дискретизација) врз основа на претходните истражувања, слични тунели во светски рамки и реални вредности кај изградени тунели во нашата држава. Потоа за секој сегмент се проценети вредности или категории на основа на влезните податоци, генерални претпоставки и дополнителни информации.

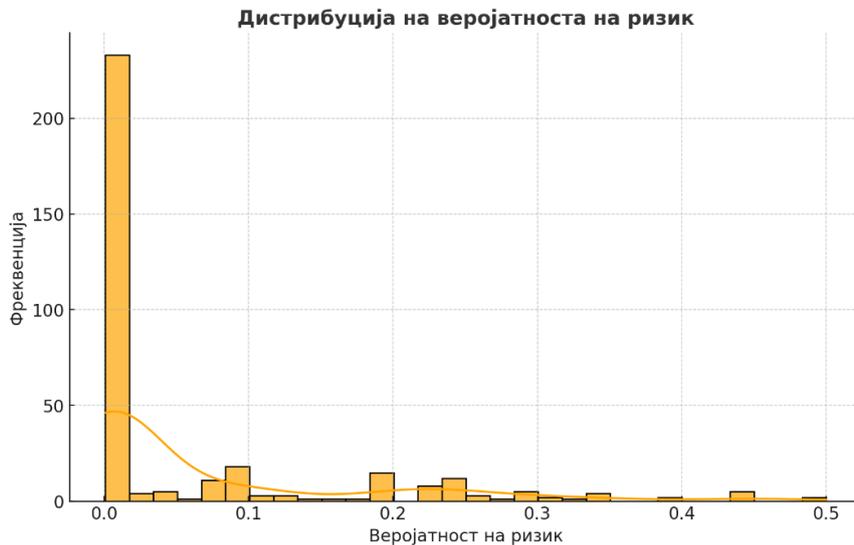
6.3.1 Модели со претходно дефинирани квантитативни вредности

Со претходно дефинирана веројатноста на појава или отстапување (Табела 6.12), секој од сегментите проценет е со конкретна вредност. Оваа вредност претставува отстапување од основниот проект во однос на променети технички решенија и/или зголемени трошоци и време за градење. Со оглед дека изградбата на тунелите е многу специфична област и има можност за промена на решенијата за ископ и подградба, затоа ризикот е дефиниран како таква вредност, која ќе ги објасни овие отстапувања во однос на оригиналните решенија.

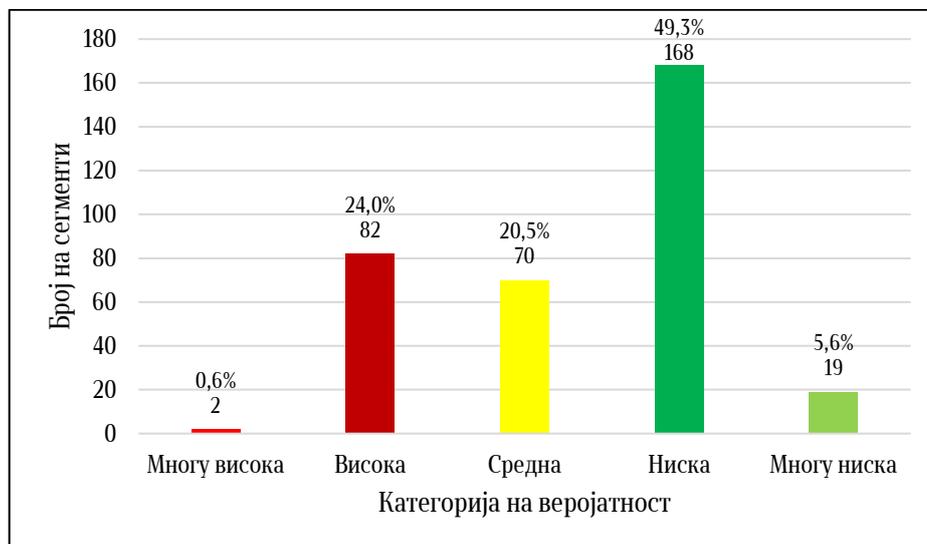
Табела 6.12 Предложена класификација за веројатноста на појава на ризици кај тунелиште

Веројатност на појава	Интервал		
Многу висока	>1/2	>0,5	≥50%
Висока	1/10 - 1/2	0,1 - 0,5	10 - 50%
Средна	1/100 - 1/10	0,01 - 0,1	1 - 10%
Ниска	1/500 - 1/100	0,002 - 0,01	0,2 - 1%
Многу ниска	<1/500	<0,002	<0,2%

Со ваквата претпоставка, направени се неколку модели за предвидување на целната променлива (веројатноста на појава). Интервалот на веројатноста на појава за сите 341 сегмент е од 0,001 до 0,50 со средна вредност од 0,065 и стандардна девијација од 0,111 (Слика 6.19). На (Слика 6.20) е прикажан дијаграм со застапеноста на сегментите во секоја категорија, од кој може да се забележи дека најголемиот број сегменти се со ниска веројатност, а најмал со многу висока.



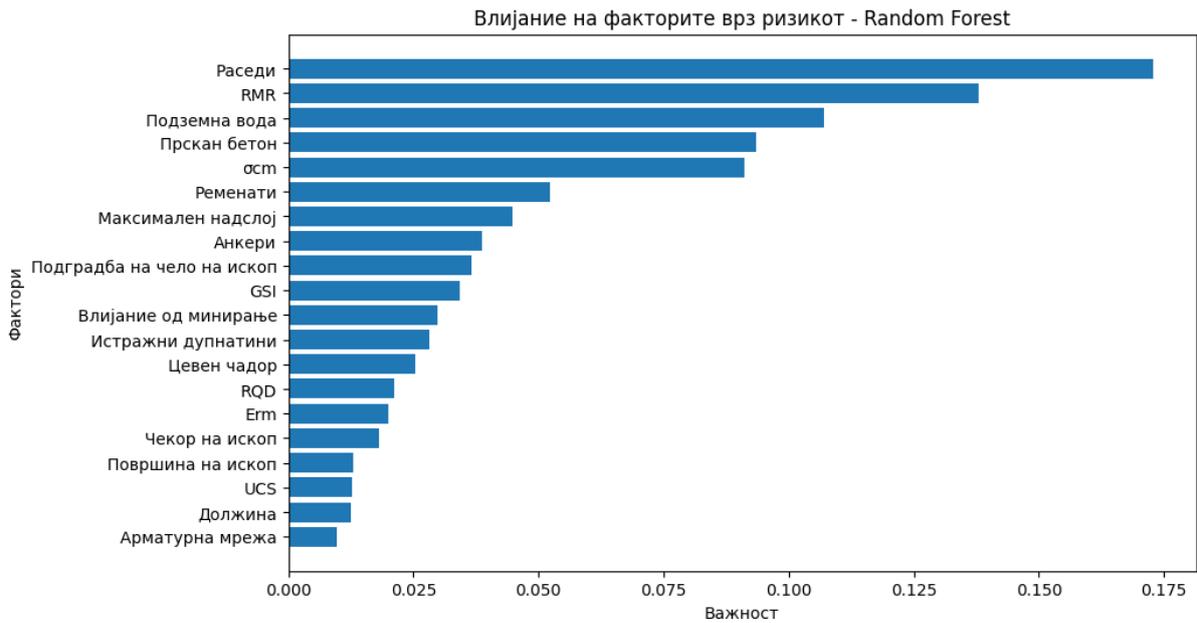
Слика 6.19 Дистрибуција на проценети веројатности на ризик за сите сегменти



Слика 6.20 Дијаграм со застапеност на сегментите во секоја категорија на проценети веројатности

А) Модел 1 со претходно проценети квантитативни ризици

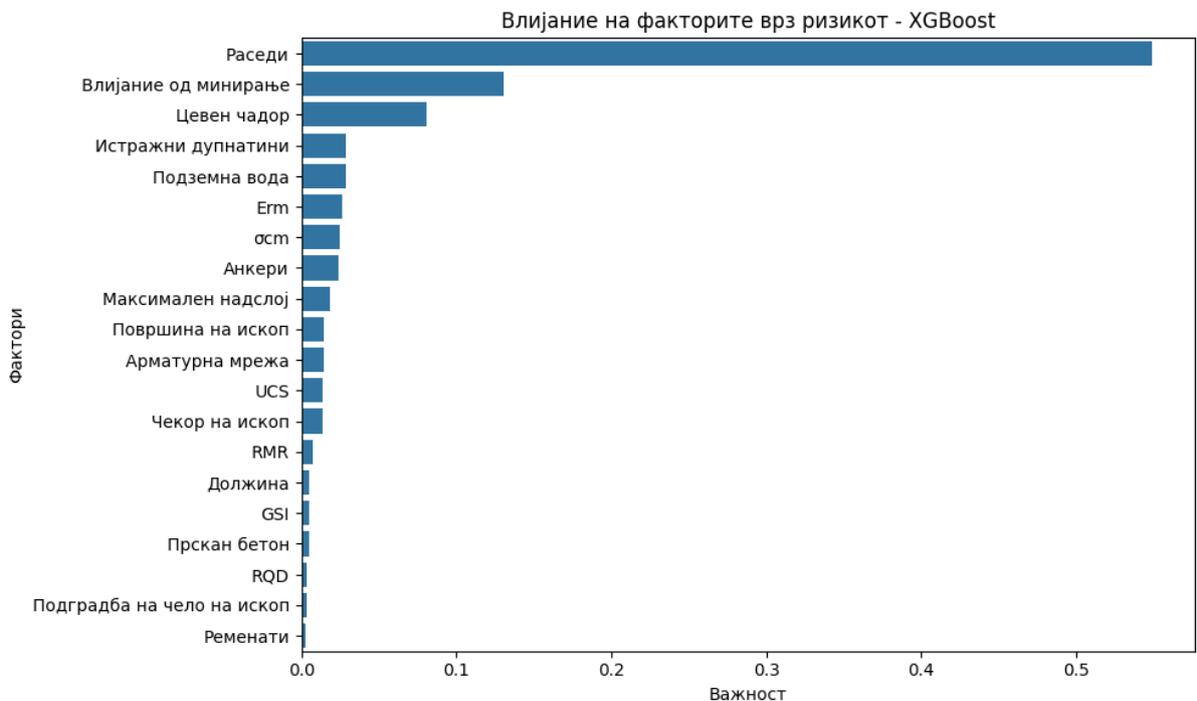
Првиот модел е со случаен шумски регресор (Random Forest Regressor), кој е сличен со случаен шумски класификатор (Random Forest Classifier), но користи континуирана варијабла (не категории). Моделот ги изучува податоците, зависностите и веројатностите на појава со тренирање и тестирање на сетови (80-20%). Тука се јавува солидна (логична) распределба на важноста (влијателноста) на влезните фактори (Слика 6.21), каде што најголемо влијание имаат раседите.



Слика 6.21 Влијателноста на факторите според модел 1 со претходно проценети ризици

Б) Модел 2 со претходно проценети квантитативни ризици

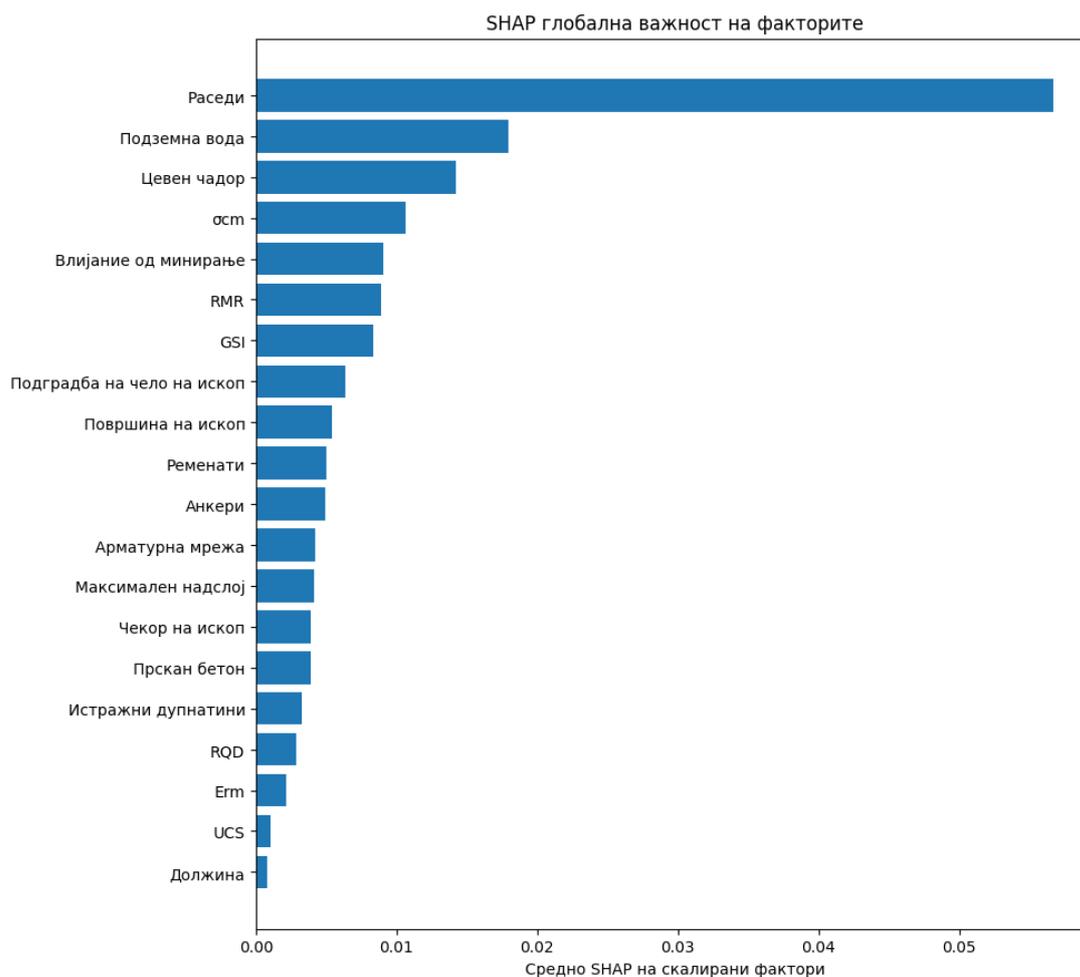
Кај овој модел (XGBoost) вредностите кои се многу блиску до 0 создаваат неурамнотеженост и бараат дополнителни трансформации и балансирање на податоците. Раседите имаат повторно доминантна улога (Слика 6.22), но нивното влијание е многу големо ($>0,5$) што го прави моделот генерално корисен само кај сегменти каде има појава на раседи.



Слика 6.22 Влијателноста на факторите според модел 2 со претходно проценети ризици

В) Модел 3 со претходно проценети квантитативни ризици

Третиот модел кај овој концепт е со примена на основна невронска мрежа. Првичната мрежа дава ниска точност, па затоа се направени модификации и оптимизации. Првата модификација на мрежата е направена со зголемени слоеви и неврони, нормализација на серијата, спречување на пренатренираност (20%), динамично намалување на стапката за учење на стабилност и 150 епохи (поминувања низ цел тренинг сет). Ваквите промени резултираат со дополнителна деградација (неточност на моделот). Во втората модификација на мрежата предложен е поедноставен модел (со 3 скриени слоеви), отфрлени се нормализацијата на серијата и спречувањето на пренатренираноста и динамичното намалување на стапката за учење на стабилност, а бројот на епохи е намален на 100. Оваа модификација дава подобри резултати на точност, но предвидува и негативни вредности за веројатноста на појава кај одредени сегменти. Бидејќи одредени веројатности на појава се многу блиску до 0 доаѓа до варијации и предвидувања во негативна област. Со оглед дека ризикот може да се разгледува од два аспекти како појава со позитивни и негативни последици, ова не претставува голем проблем и генерално се јавува кај сегменти со мал или многу мал ризик. При анализа на важноста на факторите (SHAP-SHapley Additive exPlanations и пермутација) доминираат раседите (Слика 6.23).



Слика 6.23 Важности на факторите според модел 3 со претходно проценети ризици

Г) Сумарни забелешки од моделите со претходно дефинирани квантитативни вредности

Кај сите три модели е применета K-Fold крос-валидација со K=5 (Табела 6.13). Според точноста и стабилноста моделите се приближно исти, но сепак распределбата на влијанието на факторите е различна. Најлогични влијанија се јавуваат кај првиот модел каде што има и побалансирана распределба, додека кај вториот и третиот модел се јавува доминација на еден фактор (раседи). Покрај можноста за предвидување во рамки на целата база на податоци со тренирање и тестирање (80-20%), направено е дополнително предвидување на нови 11 тунелски сегменти кои се дел од патен тунел во нашата држава, без притоа да има целна променлива (колона ризик). Првиот модел дава најдобри резултати и во делот на предвидување на нови сегменти кои се надвор од базата на податоци. За да се постигне најсоодветен резултат при ново предвидување, потребно е да се користат истиот тип (колони) на податоци како моделот кој се тренира и тестира.

Табела 6.13 Процена на точноста на триите модели со претходно проценети ризици

Параметар за процена K=5	Модел 1	Модел 2	Модел 3
MAE (Mean Absolute Error)	0,0175	0,0160	0,0169
RMSE (Root Mean Squared Error)	0,0333	0,0381	0,0341
R ² Score	0,8181	0,7631	0,8098

6.3.2 Модели со претходно дефинирани квалитативни категории

Бидејќи во најголем дел од истражувањата на ризиците, истите се категоризираат (класифицираат) во одредени групи, со примена на Бајесовите мрежи направени се неколку анализи со кои преку дискретизација на квантитативните вредности се добиваат модели за процена на ризиците.

Првично, направена е дискретизација со дефинирање на 5 категории на податоците кои според светската тунелска пракса се општо прифатени. Категориите (нивоата) се движат од многу ниско до многу високо ниво (Табела 6.14). Со применетата база на податоци, формирани се 21 јазол, но не се искористени сите дадени категории (93/105). Ваквата примена е предложена и за понатамошни истражувања за различни видови на тунели и теренски услови.

Табела 6.14 Категории за дискретизација на податоциите

Категорија	Многу ниско	Ниско	Средно	Високо	Многу високо
Должина	<20	20-100	100-500	500-1000	>1000
Максимален надслој	<10	10-20	20-50	50-100	>100
Површина на ископ	<13	13-38	38-88	88-250	>250
Истражни дупнатини	<0,001	0,001-0,005	0,005-0,010	0,010-0,030	>0,030
E _{gm}	<500	500-1500	1500-3000	3000-5000	>5000
σ _{cm}	<0,2	0,2-1,0	1,0-3,0	3,0-10,0	>10,0
RMR	<20	20-40	40-60	60-80	>80
RQD	<25	25-50	50-75	75-90	>90
GSI	<20	20-40	40-60	60-80	>80
UCS	<10	10-30	30-50	50-100	>100
Раседи	<0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	>0,8

Анкери	<5	5-20	20-50	50-90	>90
Прскан бетон	<1	1-3	3-5	5-7	>7
Арматурна мрежа	<20	20-40	40-80	80-120	>120
Ременати	<100	100-200	200-400	400-800	>800
Подградба на чело на ископ	<1,5	1,5-3,0	3,0-4,5	4,5-6,0	>6,0
Цевен чадор	<10	10-20	20-30	30-40	>40
Чекор на ископ	<0,75	0,75-1	1-2	2-3	>3
Влијание од минирање	<0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	>0,8
Подземна вода	<0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	>0,8
Ризик	<0,002	0,002-0,01	0,01-0,1	0,1-0,5	>0,5

Потоа, со користење на алгоритми кои учат од податоците направени се мрежи со јазли и врски помеѓу нив. Дел од врските се претходно дефинирани (како претходно знаење), а дел ги проценува самиот алгоритам, каде секогаш ризикот е главна целна променлива. Врските може да бидат директни поврзувања или забрани за поврзување.

А) Модел 1 со претходно проценети квалитативни ризици (M1)

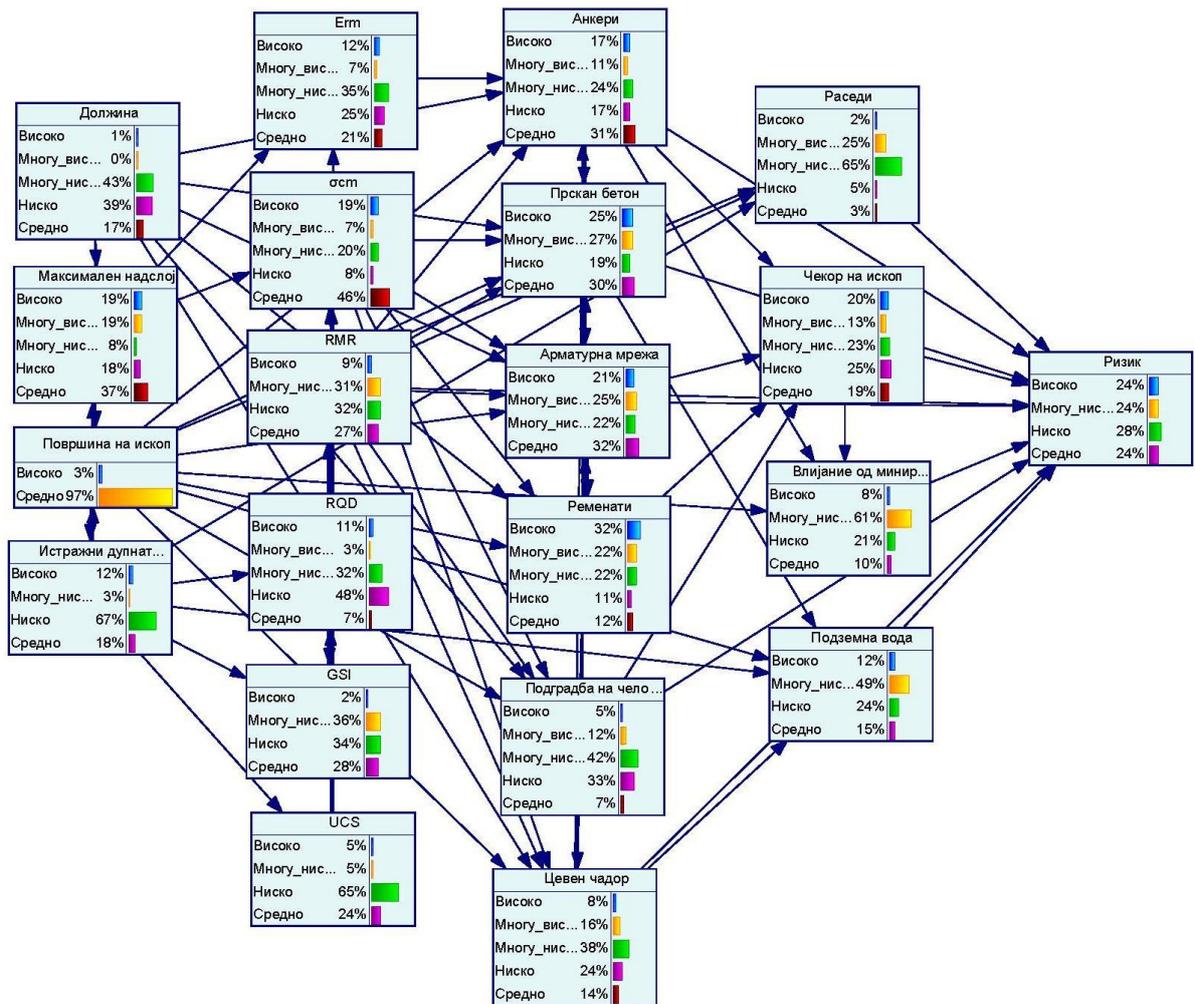
Во првата Бајесова мрежа користен е Greedy ThickThinning (GTT) алгоритмот (Слика 6.24). Вкупно има 76 директни врски помеѓу јазлите, од кои 47 се претходно дефинирани. Ризикот има најмногу, односно 10 директни врски кон него (RMR, раседи, анкери, прскан бетон, арматурна мрежа, подградба на чело на ископ, цевен чадор, чекор на ископ, влијание од минирање и подземна вода), кои имаат балансирано влијание без доминантен фактор. Ова создава доста комплексна мрежа со користени приближно 9,7 милиони независни параметри.

При валидација со примена на K-Fold (K=5) направени се неколку комбинации (Табела 6.15). Може да се забележи дека точноста е во задоволителни граници кај сите комбинации и нема многу големи отстапувања. Притоа, категоријата висок ризик како најкритична, достигнува точност на предвидување над просечната (>0,86).

Табела 6.15 Процена на просечна точноста кај Бајесова мрежа 1 со различни комбинации за валидација

Комбинација на јазли	Просечна точност на сите категории	Просечна точност на категориите на ризик
Само ризик	0,82	0,82
Ризик + геометрија	0,75	0,82
Ризик + геологија	0,75	0,78
Ризик + подградба	0,86	0,77
Ризик + технологија	0,85	0,76

Просечното влијание дадено во (Табела 6.16) претставува дел од податоците кои имаат најголемо меѓусебно влијание на врските. Може да се забележи дека геолошките фактори имаат силни корелации, односно го претставуваат најсилниот блок во мрежата.

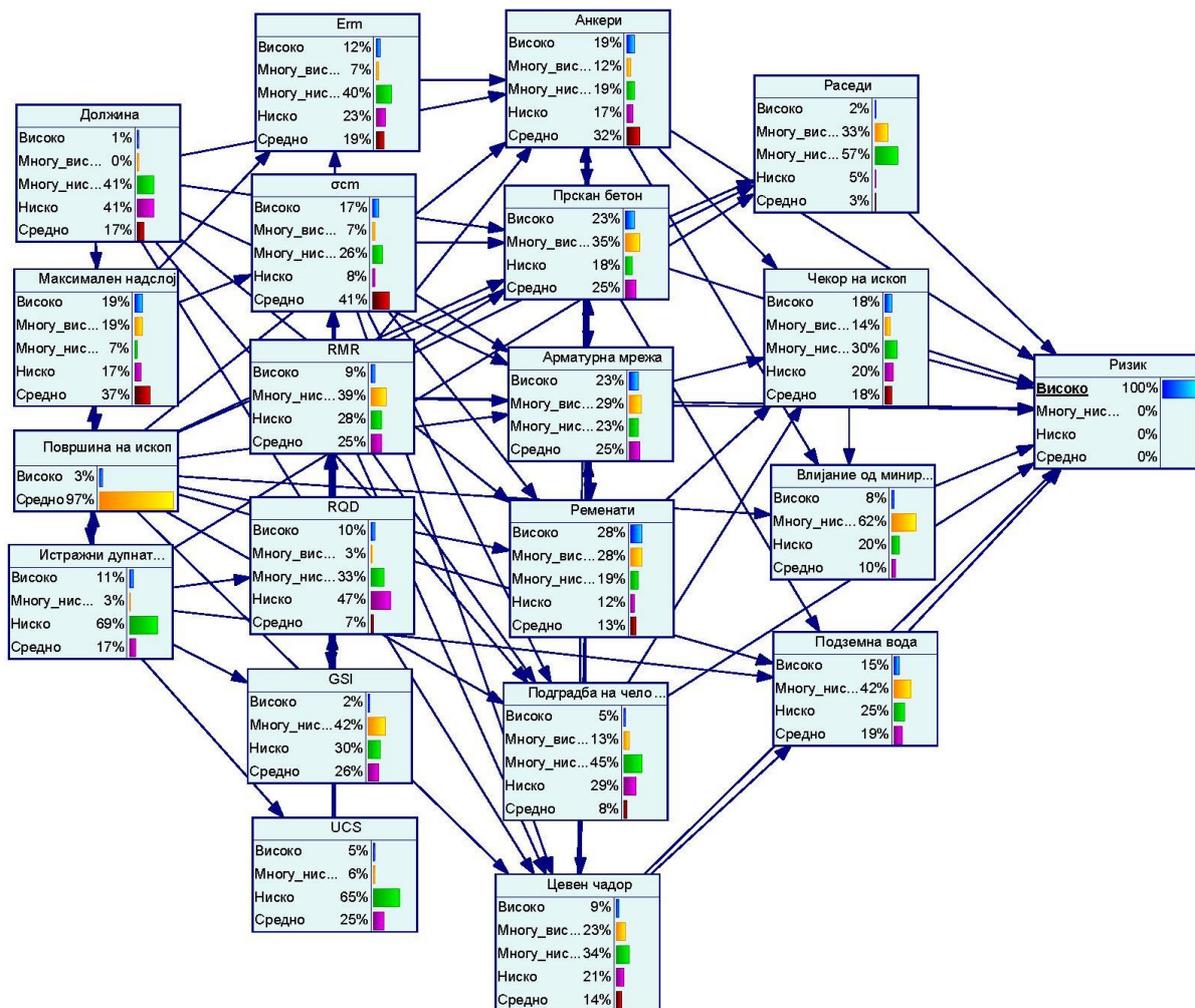


Слика 6.24 Бајесова мрежа 1 (GTT алгоритам) со распределба на податоциите без докази

Табела 6.16 Првите 10 Јазли со најголемо влијание на врските во Бајесова мрежа 1

Број	Јазол 1	Јазол 2	Просечно влијание
1	UCS	RQD	0,42
2	UCS	σ_{cm}	0,39
3	Површина на ископ	Раседи	0,39
4	RQD	GSI	0,38
5	Истражни дупнатини	RQD	0,36
6	RMR	σ_{cm}	0,35
7	GSI	RMR	0,30
8	Истражни дупнатини	GSI	0,30
9	Површина на ископ	Влијание од минирање	0,27
10	Истражни дупнатини	Максимален надслој	0,25

За сите модели, анализирано е влијанието врз другите јазли при дефиниран доказ, односно 100% висок ризик (Слика 6.25). Најголеми промени (>7%) се јавуваат кај RMR, прскан бетон, цевен чадор, раседи, чекор на ископ и подземна вода.



Слика 6.25 Бајесова мрежа 1 (GTT алгоритам) со распределба на податоциите со доказ за 100% висок ризик

Б) Модел 2 со претходно проценети квалитативни ризици (M2)

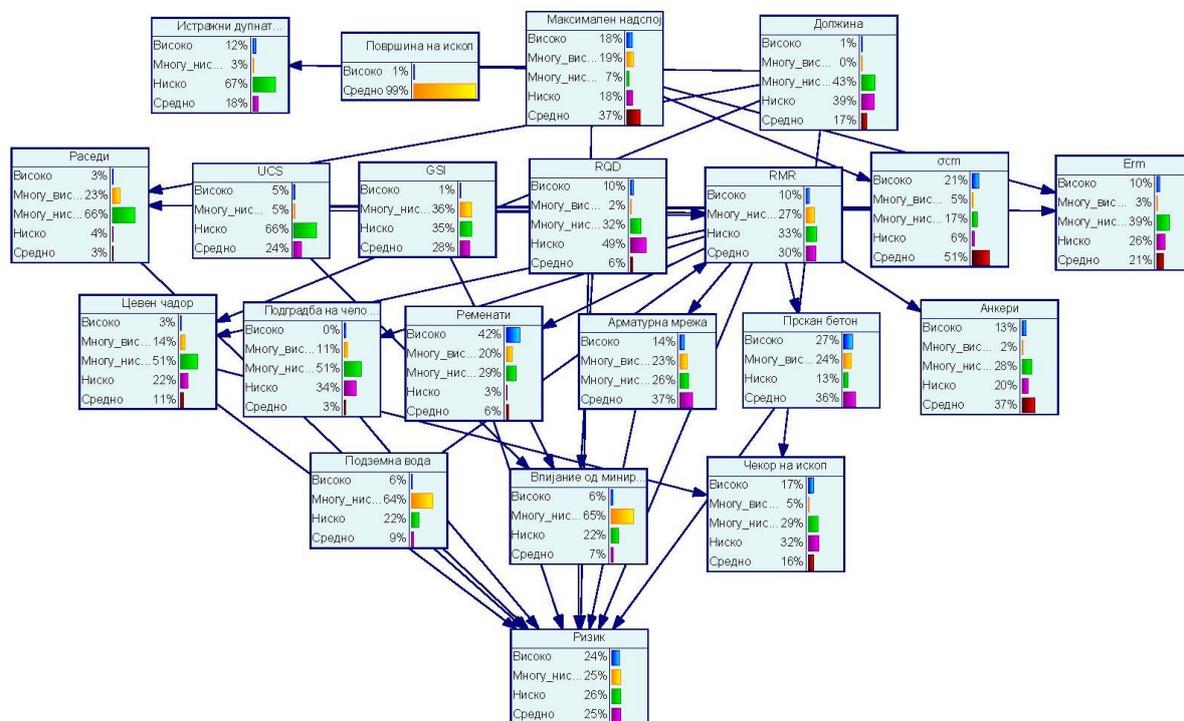
Втората Бајесова мрежа е направена со алгоритмот PC (Peter Spirtes and Clark Glymour) (Слика 6.26). Во оваа мрежа има вкупно 34 директни врски помеѓу јазлите, од кои 47 се претходно дефинирани. Ризикот е повторно со најмногу, односно 10 директни врски кон него (максимален надслој, RMR, раседи, прскан бетон, арматурна мрежа, ременати, подградба на чело на ископ, цевен чадор, влијание од минирање и подземна вода), кои се генерално балансирали освен максималниот надслој кој има пониско просечно влијание. Иако оваа мрежа има помалку директни врски таа претставува комплексна мрежа со користени приближно 9,6 милиони независни параметри.

Валидацијата на неколку комбинации (Табела 6.18) покажува дека овој модел има помала просечна точност на сите категории во однос на првиот модел, но просечната точност на категориите на ризик се слични. Притоа категоријата висок ризик не секогаш достигнува точност над просечната.

Табела 6.17 Процена на просечна тточност кај Бајесова мрежа 2 со различни комбинации за валидација

Комбинација на јазли	Просечна тточност на сите категории	Просечна тточност на категориите на ризик
Само ризик	0,88	0,88
Ризик + геометрија	0,69	0,82
Ризик + геологија	0,64	0,80
Ризик + подградба	0,60	0,72
Ризик + технологија	0,68	0,79

Во табела 6.3.8 е претставен дел од податоците кои имаат најголемо меѓусебно влијание и забележливо е дека RMR ги има најсилните врски, а со оглед дека претставува и директна врска со ризикот, тој претставува и најдоминантен јазол во оваа мрежа.



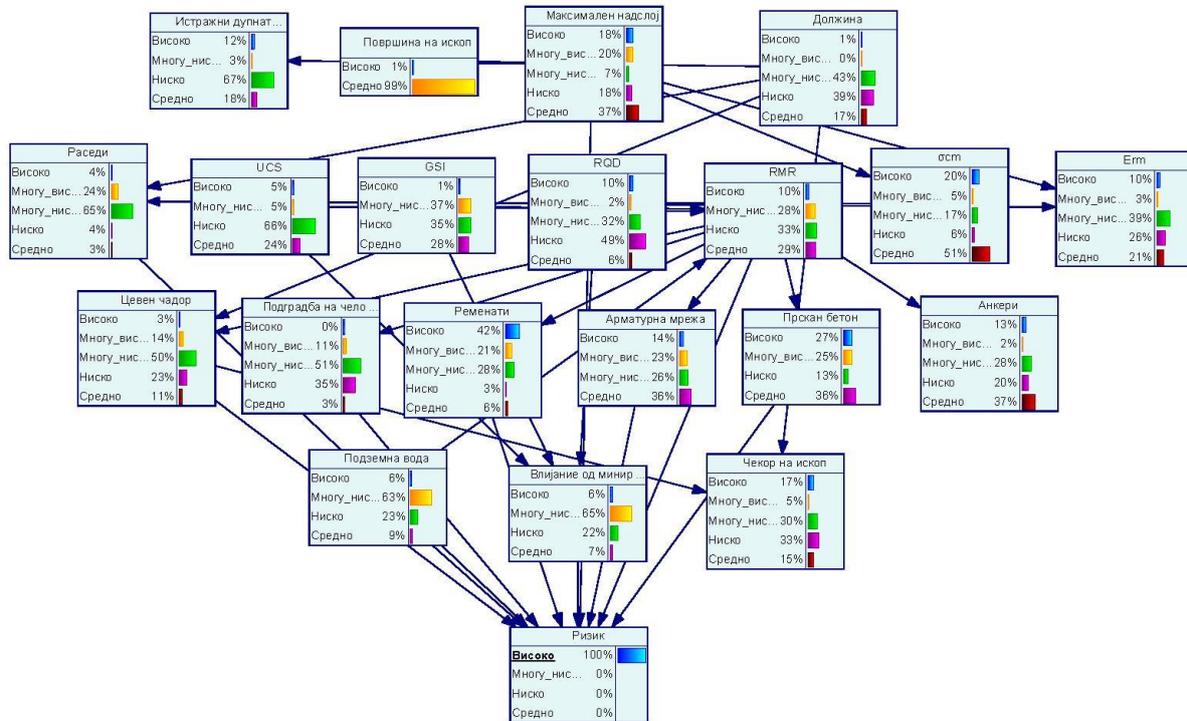
Слика 6.26 Бајесова мрежа 2 (PC алгоритам) со распределба на податоциите без докази

Табела 6.18 Првите 10 Јазли со најголемо влијание на врските во Бајесова мрежа 2

Број	Јазол 1	Јазол 2	Просечно влијание
1	RMR	Ременати	0,57
2	σcm	Erm	0,55
3	RMR	Прскан бетон	0,51
4	RMR	Подградба на чело на ископ	0,46
5	RMR	Цевен чадор	0,39
6	RMR	Анкери	0,38
7	Цевен чадор	Чекор на ископ	0,34
8	Должина	Чекор на ископ	0,33

9	Максимален надслој	Истражни дупнатини	0,32
10	Должина	Цевен чадор	0,32

При поставување доказ за 100% висок ризик (Слика 6.27) не се јавуваат големи промени кај останатите јазли (< 7%).



Слика 6.27 Бајесова мрежа 2 (PC алгоритам) со распределба на податоциите со доказ за 100% висок ризик

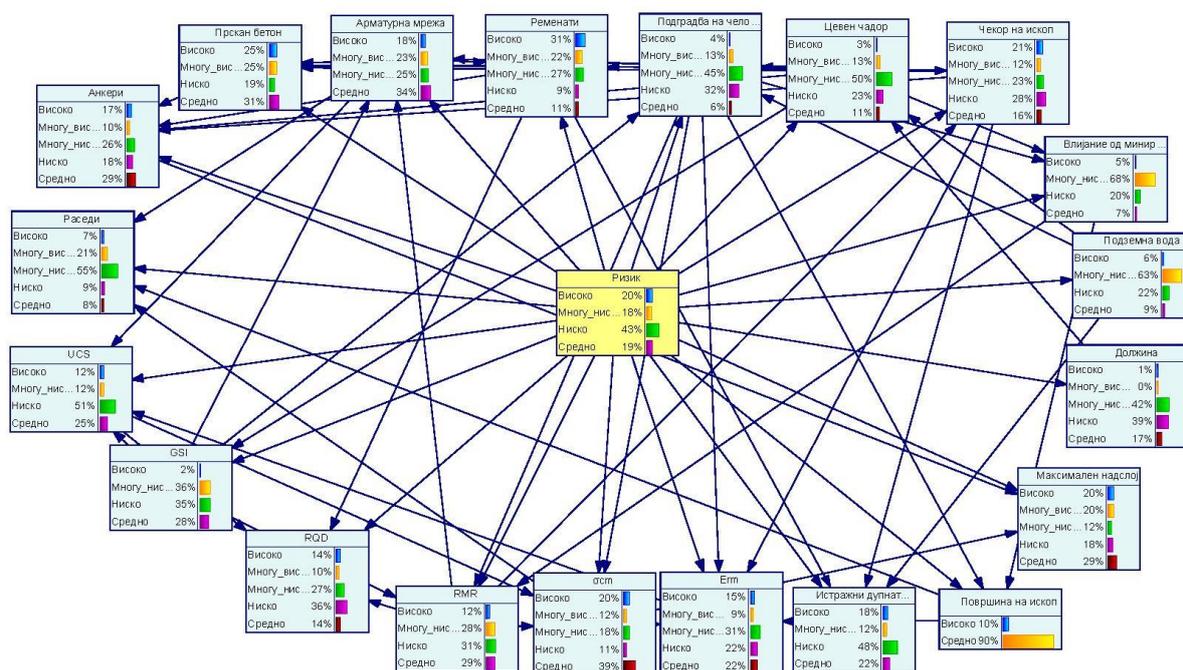
В) Модел 3 со претходно проценети квалитативни ризици (M3)

Кај третата Бајесова мрежа е користен е алгоритмот Augmented Naive Bayes (ANB) кој подрастично се разликува од првите два модели (Слика 6.28). Во овој модел нема можност за претходно дефинирање на врските (предзнаење), односно самиот алгоритам ја изучува мрежата на основа на една класна променлива и максималниот дозволен број на врски. Класната променлива која всушност е централниот јазол кој има врска со сите останати јазли во оваа анализа е ризикот, а максималниот број на врски е 10. Алгоритмот е поставен да прави 100 итерации со 300 примероци (подсетови) при секоја итерација. Во мрежата има 70 директни врски помеѓу јазлите. Ризикот како централна класна променлива има директни врски кон сите останати јазли, а другите врски се дефинирање преку учењето од податоците. Ова мрежа е далеку поедноставна од претходните со 25 илјади независни параметри и генерално се користи за да се анализира какво е влијанието на одредена променлива врз останатите во базата на податоци, но и овој модел има можност за предвидување на сите категории и јазли. При валидација овој модел дава големи точности (Табела 6.19), а категоријата на висок ризик секогаш достигнува точност над просечната.

Табела 6.19 Процена на просечна тточност кај Бајесова мрежа 3 со различни комбинации за валидација

Комбинација на јазли	Просечна тточност на сите категории	Просечна тточност на категориите на ризик
Само ризик	0,87	0,87
Ризик + геометрија	0,71	0,81
Ризик + геологија	0,77	0,74
Ризик + подградба	0,89	0,84
Ризик + технологија	0,87	0,84

Според (Табела 6.20) може да се забележи дека иако повеќето влијанија имаат логика, постојат и дел од врските кој не ја отсликуваат правилно реалната состојба.

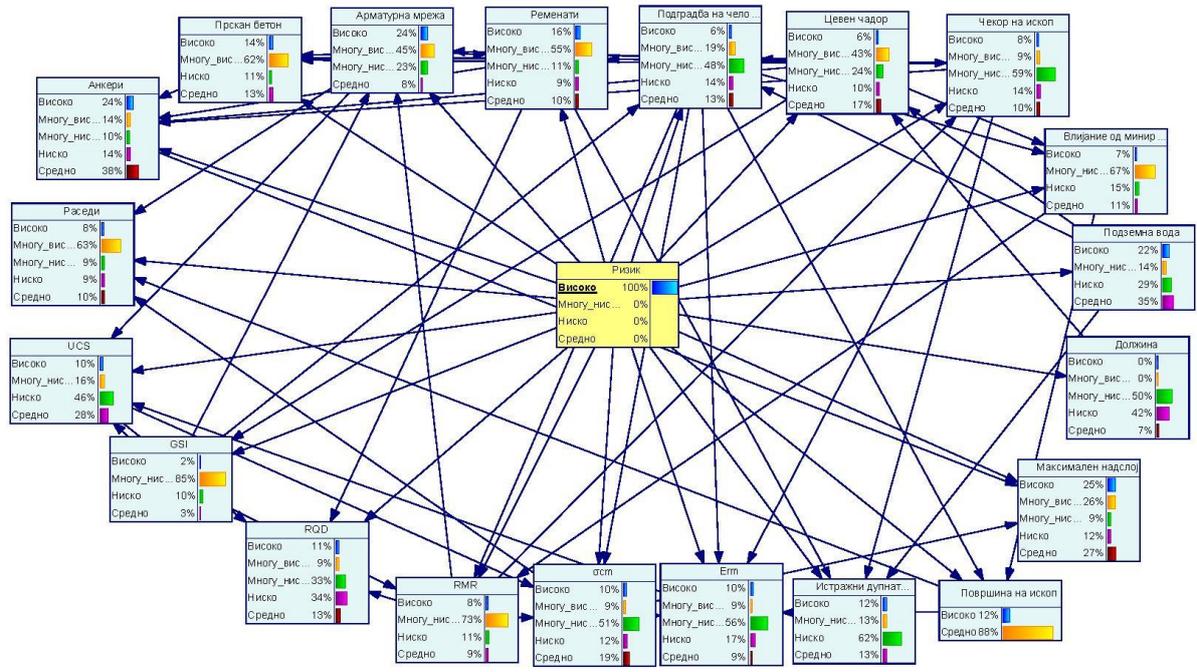


Слика 6.28 Бајесова мрежа 3 (ANB алгоритам) со распределба на податоциите без докази

Табела 6.20 Првите 10 Јазли со најголемо влијание на врските во Бајесова мрежа 3

Број	Јазол 1	Јазол 2	Просечно влијание
1	Ризик	GSI	0,45
2	Ризик	Подземна вода	0,38
3	Цевен чадор	GSI	0,35
4	Подградба на чело на ископ	Влијание од минирање	0,25
5	Подземна вода	Цевен чадор	0,25
6	Површина на ископ	Раседи	0,23
7	Цевен чадор	Влијание од минирање	0,23
8	Анкери	Максимален надслој	0,22
9	ост	Максимален надслој	0,22
10	Должина	Цевен чадор	0,22

Поставувањето доказ за 100% висок ризик (Слика 6.29) претставува најкорисниот дел од овој модел кој покажува како секој од останатите јазли се менува во однос на категориите. Преку анализа на секој од јазлите може да се одреди дали логиката на ризикот (позитивна или негативна корелација) е соодветна во однос на базата на податоци и општото учење на алгоритмите. Од мрежата се забележува дека појавата на висок ризик има големо влијание врз повеќето од јазлите со исклучок на геометриските податоци и влијанието од минирање.



Слика 6.29 Бајесова мрежа 3 (ANB алгоритам) со распределба на податоци со доказ за 100% висок ризик

Г) Сумарни забелешки од моделите со претходно дефинирани квалитативни категории и предлог со модифициран модел (M4)

Сите модели со Бајесови мрежи имаат приближно иста просечна точност, но кај првиот и третиот модел вредностите се побалансирани. Вкупниот број на јазли е ист, а бројот на врски и условни комбинации е различен.

Како најдобар во однос на валидација, влијание на врски и промени при докази е првиот модел (M1). Кај вториот модел (M2) RMR се јавува како многу доминантен фактор на влијание и имаме мали промени при докази. Третиот модел (M3) дава одредени нелогични влијанија, но дава големи и корисни промени при докази. Како комбинација третиот модел би можел да се користи како првична и почетна анализа со цел да се процени како ризикот влијае врз останатите податоци, а првиот модел за предвидување на ризици и дефинирање на влијание на врските помеѓу јазлите.

Бидејќи овие модели се прилично комплексни, направен е четврт модифициран модел на основа на првиот модел (GTT алгоритам) кој се покажа како најдобар, со редуциран број на категории за дискретизација (Табела 6.21). Целта на оваа модификација е да се поедностави Бајесовата мрежа, да се искористат сите комбинации на категории (63/63) и да се разгледа можноста за подобрување на точноста и стабилноста.

Редуцираната дискретизација е направена со балансирање во однос на бројот на податоци во секоја категорија. Ваквиот пристап има и негативна страна во делот на опис на категориите, односно применливоста е лимитирана на тунели со слични бази и распон на податоци. Оваа Бајесова мрежа (Слика 6.30) има 79 директни врски (слично како првиот модел), но приближно 160 илјади независни параметри.

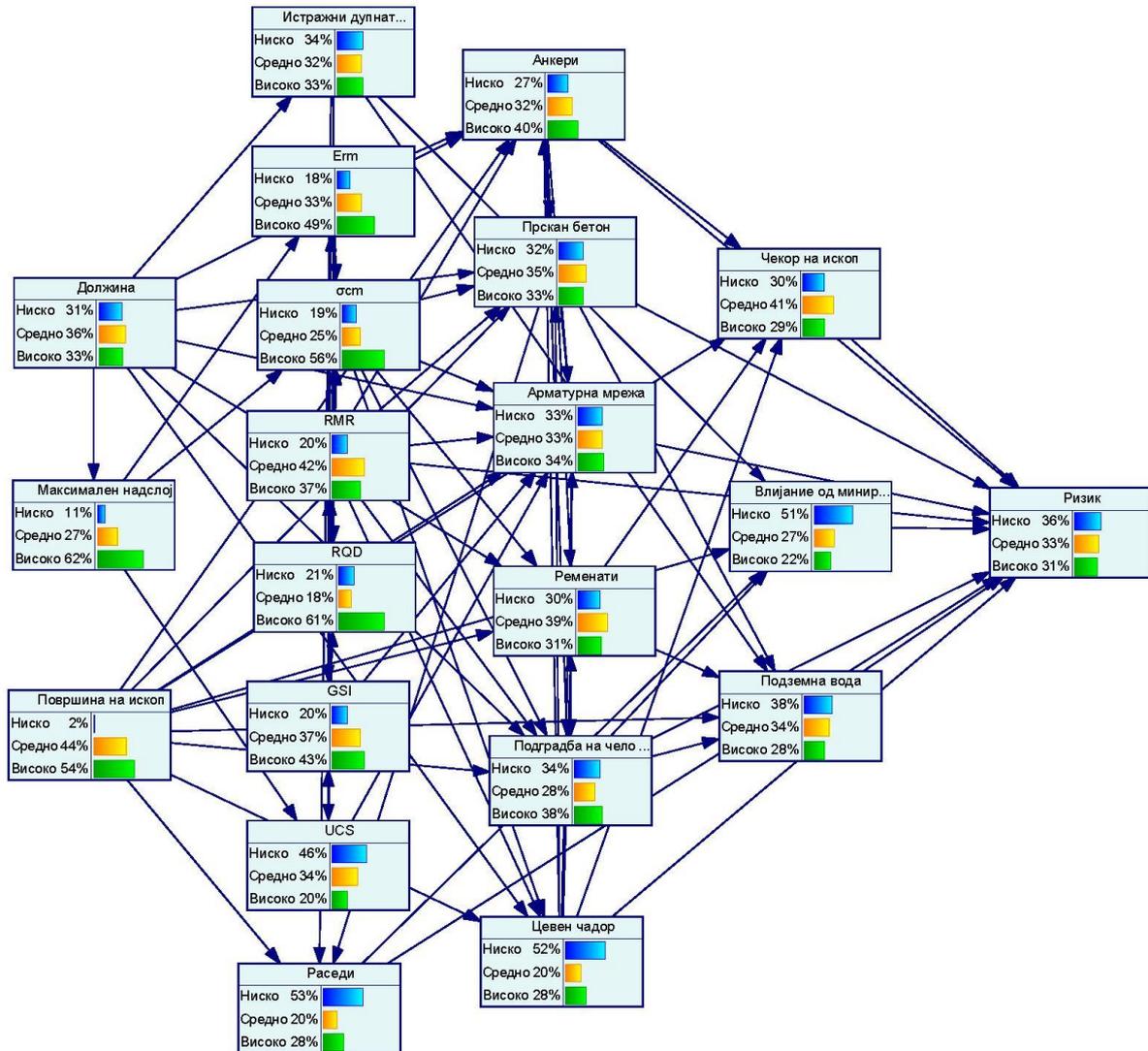
Табела 6.21 Дискретизација со намален број на категории

Категорија	Ниско	Средно	Високо
Должина	<20	20-60	>60
Максимален надслој	<30	30-60	>60
Површина на ископ	<67	67-74	>74
Истражни дупнатини	<0,002	0,002-0,004	>0,004
E_{tm}	<500	500-2000	>2000
σ_{cm}	<1,8	1,8-3,0	>3,0
RMR	<30	30-50	>50
RQD	<30	30-45	>45
GSI	<20	20-40	>40
UCS	<30	30-50	>50
Раседи	<0,2	0,2-0,5	>0,5
Анкери	<10	10-40	>40
Прскан бетон	<3,5	3,5-6,5	>6,5
Арматурна мрежа	<45	45-85	>85
Ременати	<250	250-650	>650
Подградба на чело на ископ	<0,5	0,5-2,0	>2,0
Цевен чадор	<10	10-30	>30
Чекор на ископ	<1	1-2	>2
Влијание од минирање	<0,2	0,2-0,5	>0,5
Подземна вода	<0,2	0,2-0,5	>0,5
Ризик	<0,01	0,01-0,20	>0,20

При анализа на влијанијата на јазлите (Табела 6.22) може да се забележи дека доминираат врските на геолошките фактори.

Табела 6.22 Првите 10 Јазли со најголемо влијание на врските во модифицираната Бајесова мрежа

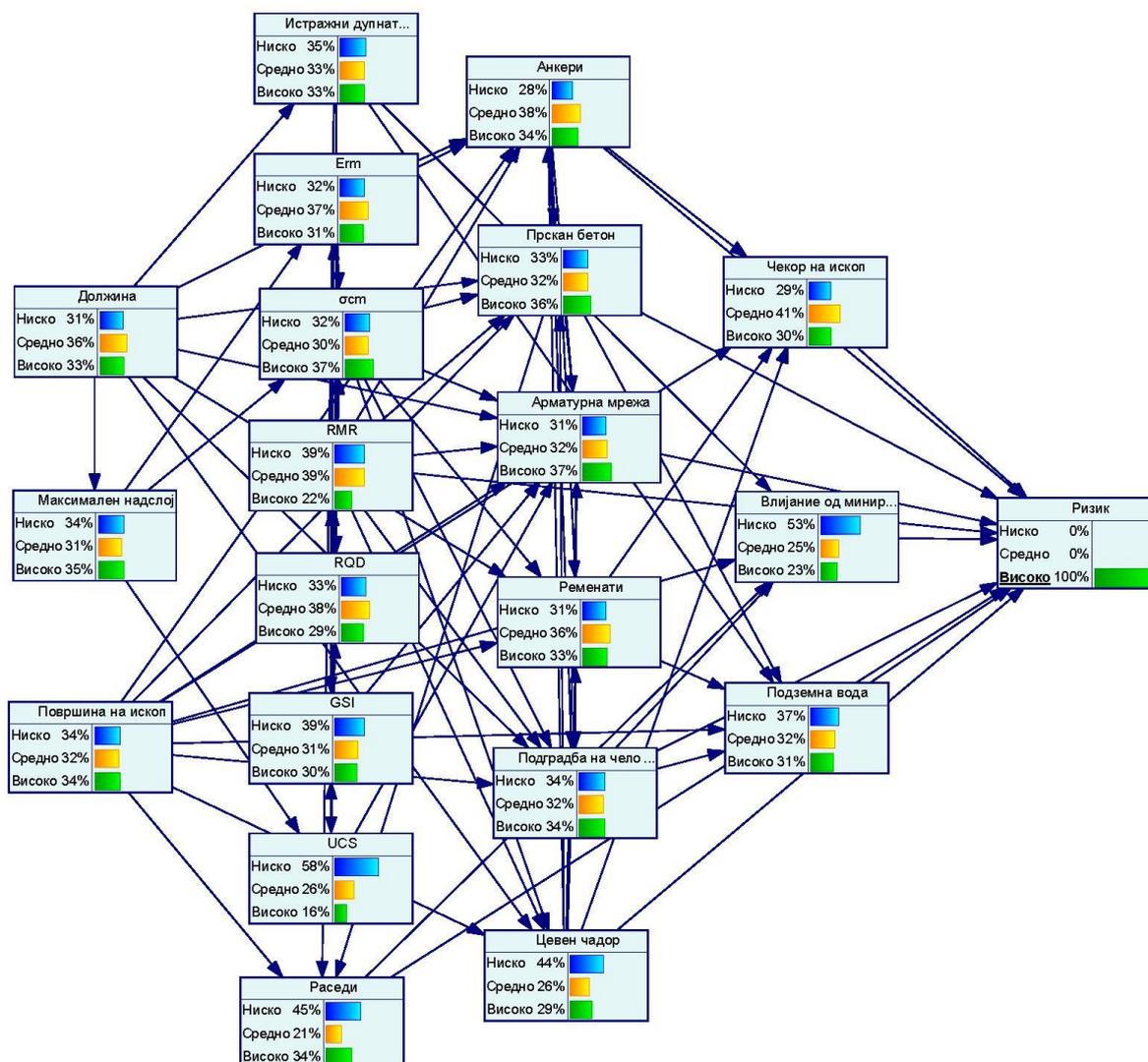
Број	Јазол 1	Јазол 2	Просечно влијание
1	RMR	E_{tm}	0,70
2	GSI	RMR	0,58
3	Истражни дупнатини	UCS	0,39
4	UCS	RMR	0,36
5	Максимален надслој	UCS	0,34
6	RMR	σ_{cm}	0,33
7	UCS	GSI	0,33
8	Истражни дупнатини	GSI	0,33
9	E_{tm}	σ_{cm}	0,32
10	UCS	RQD	0,30



Слика 6.30 Модифицирана Бајесова мрежа (ГТТ алгоритам) со распределба на податоци без докази

Со дефиниран доказ, односно 100% висок ризик (Слика 6.31) најголеми промени (>7%) се јавуваат кај максималниот надслој, површината на ископ и кај геолошките фактори (освен истражните дупнатини), а кај подградбата најголемата промена е кај цевниот чадор.

Во однос на сите четири модели, оваа модифицирана Бајесова мрежа (M4) достигнува поголема просечна точност (Табела 6.23) во однос на претходните три, но сепак разликата е мала. Сите модели може да се користат посебно со што првиот (M1) дава најстабилна и логична анализа, вториот (M2) е применлив доколку имаме прецизно одреден RMR, кај третиот (M3) најкорисна е распределбата со докази, а четвртиот (M4) е добар при поголема база на податоци во однос на бројот на сегменти. За подетална анализа препорачана е континуирана примена, каде што почетни се M3 и M4 со кои може да се процени влијанието на ризикот врз останатите фактори и комплексноста и распределбата на мрежата во однос на дискретизација, а потоа со M1 или M2 да се добие финалната Бајесова мрежа која најдобро ги опишува реалните состојби.



Слика 6.31 Модифицирана Бајесова мрежа (ГТТ алгоритам) со распределба на податоциите со доказ за 100% ризик

Табела 6.23 Процена на просечна точноста кај сите модели со преходно дефинирани квалитативни категории

Комбинација/модел	Просечна точност на сите категории				Просечна точност на категориите на ризик				Просечна точност на секоја комбинација
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	
Само ризик	0,82	0,88	0,87	0,90	0,82	0,88	0,87	0,90	0,87
Ризик + геометрија	0,75	0,69	0,71	0,78	0,82	0,82	0,81	0,89	0,78
Ризик + геологија	0,75	0,64	0,77	0,77	0,78	0,80	0,74	0,86	0,76
Ризик + подградба	0,86	0,60	0,89	0,91	0,77	0,72	0,84	0,87	0,81
Ризик + технологија	0,85	0,68	0,87	0,89	0,76	0,79	0,84	0,78	0,81
Просечна точност за сите комбинации	0,81	0,70	0,82	0,85	0,79	0,80	0,82	0,86	0,81

Сите Бајесови мрежи се направени со софтверот „Genie 5“ кој овозможува градење и учење на интерактивни Бајесови модели преку графички кориснички интерфејс.

7. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

7.1 Анализа на резултатите

Во рамките на ова истражување извршена е сеопфатна анализа на ризиците кои се јавуваат кај проектите за тунели. Резултатите потврдуваат дека највисокото ниво на ризик се појавува во фазата на изградба, што се совпаѓа со светските искуства при реализација на сложени подземни проекти (Guo, Zheng, Zhang, & Yang, 2022; Han, et al., 2023; Sousa, 2010; Sun, Liu, Chu, Chen, & Li, 2018; Wang, et al., 2023).

Во прелиминарната анализа со направени неколку статистички и корелациони анализи и пробни модели, дефиниран е финалниот број од 20 влезни податоци кои даваат логични и ефикасни решенија. Притоа, исфрлени се дел од податоците (надолжен наклон, радиус, површина на слободен профил, број на дупнатини, волуменска тежина, кохезија, агол на внатрешно триење и финална бетонска облога) бидејќи создаваат несоодветни корелации и влијанија, а за одреден дел (RMR, RQD, GSI, чекор на ископ) кои првично се претставени во граници (од-до), направено е усреднување со цел да се добие една вредност. Како втор дел од прелиминарната анализа е комбинацијата на дрвото на грешки и настани за најкритичните (најспецифични) тунели од Коридорот 8. Притоа, користена е целата база на податоци (без редукција), каде што прво е разгрането дрвото на грешки со почеток од главниот настан (хазард) во насока на четирите основни групи, а потоа и основните настани кои всушност се податоците од базата. Колапсот има поголема веројатност од поплавата, која достигнува вредности и над 0,5. Овие хазарди без никакви мерки всушност претставуваат висок иницијален ризик, но резидуалните (финални) ризици добиени преку дрвото на настани се добиваат со мали и многу мали веројатности на појава. Покрај добиените резултати за различни веројатности на хазарди и ризици, од овие дрва потврдено е малото влијание на одредени податоци кои се отстранети во првичната анализа.

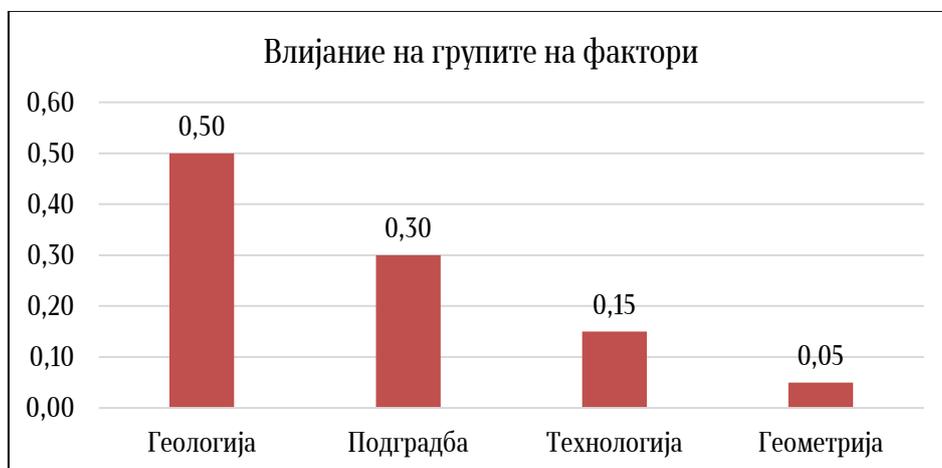
Бидејќи при анализите на ризиците особено при поголем број на податоци, може да биде комплицирано да се одредат конкретни квалитативни категории или квантитативни вредности, првично е пристапено без целна променлива. Со примена на 3 различни методи за кластеризација добиени се различен број на оптимални кластери, односно тунелски сегменти со слични карактеристики. При анализа на кластерите дефинирани се 4 и 6 групи со различно ниво на ризик, а потоа се направени 3 модели со машинско учење кои можат да учат и да ги предвидуваат групите со висока точност (>0,9), но со различни распределби на влијанијата на влезните параметри. Притоа, анализирани се влијанијата со и без модифицирани тежини кај влезните параметри. Првиот модел (Random Forest) дава најсоодветна распределба на влијателните фактори за сите 3 кластеризации. Потоа е направена уште една модифицирана кластеризација со фиксен број од 3 кластери и повторно 3 машински модели за учење и предвидување, каде што повторно првиот модел е најдобар. Генерално кај сите кластеризации доминираат сегменти со среден ризик.

Кај вториот концепт, првично секој од сегментите е проценет со квантитативна вредност која претставува веројатност на појава или отстапување од основниот проект во однос на променети технички решенија и/или зголемени трошоци и време за градење. Најголемиот број на сегменти имаат ниска веројатност. Со вака претходно дефинирани

ризици кај секој од сегментите, направени се 3 модели кои ги изучуваат податоците, зависностите и веројатностите на појава преку тренирање и тестирање на сетови (80-20%). Точноста и стабилноста која е добиена со крос-валидација ($K=5$), приближно е иста кај сите модели ($\approx 0,8$), при што првиот модел (Random Forest) има побалансирана распределба во однос на другите два каде доминираат раседите. Со направените модели направено е дополнително предвидување на тунелски сегменти кои не се дел од базата на податоци, со што првиот модел повторно дава најдобри резултати.

Другиот пристап кај вториот концепт е со дискретизација (категоризација) на податоците и примената на Бајесови мрежи. Првично се развиени 3 Бајесови мрежи кои имаат 21 јазол (влезни податоци и ризик) со 95 од можни 105 категории за дискретизација. Кај сите мрежи има различен број на директни врски меѓу јазлите од кои дел се претходно дефинирани, а најголем број на врски се кон јазолот ризик. Како најдобар во однос на валидација, влијание на врски и промени при докази е првиот модел со GTT алгоритмот. Кај вториот модел со РС алгоритам, еден параметар (RMR) се јавува како многу доминантен и има мали промени при докази, а кај третиот модел (ANB) се добиваат одредени нелогични влијанија, но корисни промени при докази. Предложениот четврт модифициран модел користи GTT алгоритам како првиот, но е поедноставен бидејќи се користат по 3 категории за дискретизација. Сите 4 модели покажуваат солидна просечна точност ($\approx 0,81$) и може да се користат при управување со ризици кај тунели, со слична или поголема база на податоци, при што бројот на категории и директни врски треба детално да се истражат, иако општите препораки за дискретизација се насочени кон помал број на балансирани категории. Сепак помалиот број на категории не секогаш може да ги објаснат реалните состојби и вредности, па кога мрежите стануваат многу комплексни може истите да се поделат на неколку помали, доколку тоа е возможно од аспект на решавање на проблемот.

Обработените податоци покажуваат дека геолошко-геотехничките несигурности имаат доминантно влијание врз иницијалниот ризик, додека подградбата и технологијата на изградба најчесто го зголемуваат резидуалниот ризик доколку не се постапи соодветно (Слика 7.1). Во однос на самите фактори генерално раседите најмногу придонесуваат за високи ризици, што е очекувано. Посебно значаен резултат е дека, интензитетот на ризикот не е линеарен во однос на надслојот и должината на тунелот, туку зависи од нивната меѓусебна интеракција и присуството на слаби геолошки зони.



Слика 7.1 Анализа за релативно влијание на главните групи на фактори во однос на ризиците

Од анализата на ризиците на железничките тунели на Коридор 8 добиени се генерално слични податоци за проценетите ризици во однос на надминување на проектираните трошоци и време за изградба (Табела 7.1). Многу висок ризик се јавува само кај неколку сегменти на најдолгиот тунел (тунел 6 од трета делница) и со оглед дека ова е многу мал процент ($\approx 1\%$) од вкупниот број на сегменти, дел од моделите го апсорбираат овој ризик во рамки на висок ризик. Ова е генерален проблем при голема база на податоци со мал број на екстремни вредности, каде се јавува потешкотија да се учи и создаде предвидување од само неколку примероци. Кај повеќето модели околу 20% од сегментите (≈ 70 сегменти) се со висок ризик, односно висока веројатност значително да се променат проектните решенија и да се надминат трошоците и времето за изградба (10-50%). Најголемиот дел од сегментите со висок ризик припаѓаат на втората делница $>80\%$, а потоа следат третата $\approx 13\%$ и првата $\approx 3\%$ (Табела 7.2). Понатаму, распределбата зависи од усвоениот број на категории на ризик, при што просечно средниот ризик е околу 23%, односно 17% доколку имаме 4 или 5 категории, и 30-45% доколку имаме 3 категории. Средниот ризик го има скоро подеднакво кај втората и третата делница $\approx 48\%$ и многу малку кај првата делница $\approx 4\%$. Кај најниските категории, просекот е 47% за низок и околу 13% за многу низок ризик. Во однос на сите делници, најмногу сегменти со низок ризик има кај втората делница $\approx 59\%$, а со многу низок ризик кај третата делница $\approx 59\%$.

Табела 7.1 Процентуално учество на сите сегменти во секоја категорија на проценети ризици според развиените модели

Модел	Учество на сегменти во секоја категорија на проценети ризици (%)				
	Многу висок	Висок	Среден	Низок	Многу низок
Без претходно проценети ризици					
I. Ward	/	20	18	55	7
II. K-Means	/	21	17	47	15
III. GMM	2	20	13	45	20
IV. Модиф.	/	23	46	31	/
Со претходно проценети ризици					
Квантитативни вредности	0,6	24,0	20,5	49,3	5,6
Квалитативни категории (просечно од 3 модели)	/	20	18	43	20
Модифицирани квалитативни категории	/	13	31	56	/
Просечно	1	20	23	47	13

Табела 7.2 Процентуално учество на сегменти во секоја категорија во однос на сите делници

Просечно по делници	Многу висок	Висок	Среден	Низок	Многу низок
Делница 1	0	3	4	23	20
Делница 2	0	84	47	59	27
Делница 3	100	13	49	18	53

Ако се анализира секоја делница посебно (Табела 7.3), тогаш може да се забележи дека сегментите кај првата делница имаат доминантно низок и многу низок ризик. Кај

втората делница имаме побалансирани учества во категориите со најголем процент на низок ризик. Сегментите кај третата делница се приближно исто распределени во категориите на среден, низок и многу низок ризик, а мал дел учествуваат во многу висок и висок ризик. Бидејќи само првата делница е во фаза на изградба, во координација со изведувачот можеше да се спореди реалната промена која изнесува приближно 13% со проценетите ризици кои изнесуваат 11% (4% висок и 7% среден ризик). Овие вредности се прилично блиску со што се валидираат моделите за процена на ризиците.

Табела 7.3 Процентуално учество на сегментите за секоја делница поособно

Просечно по делници	Многу висок	Висок	Среден	Низок	Многу низок
Делница 1	0	4	7	64	25
Делница 2	0	28	21	40	11
Делница 3	4	9	32	29	26

Земајќи ги предвид сите овие просечни вредности може да се заклучи дека поголемиот дел од сегментите се со мал (низок и многу низок) ризик ($\approx 60\%$), каде што нема потреба од никакви дополнителни мерки. За среден ризик ($\approx 23\%$) треба да се врши континуирано следење на состојбата на изградба и ова може да се дефинира и како ALARP регион, каде што ризикот треба да биде намален доколку средствата се рационални. За многу висок и висок ризик ($\approx 20\%$) се препорачува да се превземат дополнителни мерки пред и за време на фазата на изградба. Пред изградбата може да се направат дополнителни теренски истраги (по можност во зоната на сегментите) и доколку е потребно измени на основните проекти со нови ажурирани податоци. За време на изградбата, потребно е детално следење на состојбата и по потреба измена на методот на ископ (повеќе фази) и подградбата (дополнителни елементи). Промените (дополнителните мерки) за време на изградбата вообичаено генерираат повеќе трошоци и време за реализација, па се препорачува првично да се интервенира во однос на ризиците пред да се започне со изградбата.

Покрај ова направена е дополнителна анализа на трошоците, односно влијанието на ризиците врз вкупните трошоци за сите сегменти. Земајќи ги предвид главните тунелски работи кои имаат влијание врз ризикот, односно ископот и примарната подградба (анкери, прскан бетон, арматурна мрежа, ременати, подградба на чело на ископ-прскан бетон и цевен чадор), пресметани се вкупните трошоци за секој сегмент со просечни (актуелни) единечни цени во 2025 година (Табела 7.4).

Табела 7.4 Пресметани трошоци за ископ и примарна подградба (главни тунелски работи) на анализираниите сегменти

Трошоци	Вкупни трошоци на главни тунелски работи по сегмент	Трошоци за m' на главни тунелски работи	Вкупни трошоци за главни тунелски работи за сите сегменти
Максимум	€ 7.650.996,00	€ 19.233,03	€ 162.077.910,49
Просечно	€ 475.301,79	€ 8.037,64	
Минимум	€ 23.703,81	€ 2.867,67	

Доколку се примени процентуалното учество на сегментите со висок и среден ризик (Табела 7.1), во однос на трошоците се добиваат нови вредности за вкупното чинење за различни сценарија (Табела 7.5). Може да се забележи колку изнесуваат

дополнителните трошоци посебно и заедно за сегментите со среден и висок ризик, односно надминувањето на вкупното чинење без ризици кое е во граници од 0,23% (при најнеризично сценарио со 1% зголемени трошоци за среден ризик) до 12,3 % (при најризично сценарио со зголемени трошоци од 10% за среден ризик и 50% за висок ризик).

Табела 7.5 Пресметани трошоци за главните тунелски работи за сегментите со влијанието на проценетите ризици при различни сценарија

Учество на сегменти во категорија на проценети ризици	Зголемени трошоци	Вкупно трошоци без ризици	Дополнителни трошоци	%	Вкупни трошоци со ризици
23% среден ризик	1%	€ 162.077.910,49	€ 372.779,19	0,23%	€ 162.450.689,69
	Просечно		€ 2.050.285,57	1,27%	€ 164.128.196,06
	10%		€ 3.727.791,94	2,30%	€ 165.805.702,43
20% висок ризик	10%		€ 3.241.558,21	2,00%	€ 165.319.468,70
	Просечно		€ 9.724.674,63	6,00%	€ 171.802.585,12
	50%		€ 16.207.791,05	10,00%	€ 178.285.701,54
23% среден и 20% висок ризик	1+10%		€ 3.614.337,40	2,23%	€ 165.692.247,90
	Просечно		€ 11.774.960,20	7,27%	€ 173.852.870,69
	10+50%		€ 19.935.582,99	12,30%	€ 182.013.493,48

Споредено со други истражувања во светот од оваа проблематика, моделите и резултатите го следат трендот на примена на нови пристапи за управување со ризиците. Изработката на соодветна база на податоци и предложување на категории и поделби на почеток бара детална разработка и примена на светски препораки и искуства. Комбинацијата на методи, алатки, алгоритми и принципи за процена и анализа на ризиците е динамички процес, кој тука е дефиниран со класични и напредни модели. Резултатите во многу делови се поклопуваат со светските истражувања (Huang, et al., 2025; Ju, et al., 2025; Khodabakhshian, 2023; Sun, Liu, Chu, Chen, & Li, 2018; Yang & Chen, 2025; Špačková, 2012), а со оглед на специфичноста на податоците и регионот придонесуваат и нови сознанија.

7.2 Дискусија

Општата анализа на резултатите ја потврдува вредноста на интегрираниот пристап кон управувањето со ризици. Ова истражување ја обединува квантитативната точност на инженерската анализа со флексибилноста и интелигенцијата на современите алгоритми и методи. Главната идеја се заснова на тоа дека ризикот не претставува фиксен и изолиран параметар, туку динамичен систем на меѓусебно зависни фактори, чија интеракција го одредува целокупното ниво на безбедност и сигурност на конструкцијата.

Примената на квантитативни методи овозможи систематско пресметување на веројатностите за појава на несакани настани и идентификација на најчувствителните делови на конструкцијата. Промените на геолошките и хидрогеолошките услови, подградбата, несоодветните технолошки постапки и човечкиот фактор создаваат комплексна мрежа на влијанија што може да резултира со колапс, поплава или други несакани појави, а ова е проследено со временски и економски последици од различен интензитет. Во текот на анализата беше забележано дека геолошко-геотехничките параметри имаат најсилно влијание врз ризиците. Дел од податоците како коефициентот

на истражни дупнатини и претходно дефинираниот ризик, кога имаат многу мали вредности (блиску до 0) потешко е да се проценат во некои модели, што насочува кон употреба на поголеми вредности или нивно целосно отфрлање. Дефинирањето на финалната форма на ризикот претставува посебен предизвик, па затоа се прикажани два пристапи со и без претходно дефиниран ризик, на кои им претходи и прелиминарна анализа.

Моделите базирани на машинско учење овозможуваат интеграција на голем број влезни параметри и нивна анализа во целина, при што резултатите претставуваат синтетичка процена на веројатноста за појава на ризик. Овој аспект ја потврдува вредноста на комбинирањето на класичната инженерска логика со современите техники. Вака развиените модели нудат висока точност, но ограничувања вклучуваат: доминација на одредни параметри (можна преголема сензитивност), негативни предвидувања кај невронските мрежи и потреба од голема база на податоци за генерализација. Квалитативните модели или семи-квантитативните се поедноставни за практична примена и може да дадат покорисни резултати кога е возможно групирање на влезните податоци и ризиците.

Резултатите ја потврдуваат и потребата од рано препознавање на ризичните делови и нивно проактивно управување. Ваквиот развој на модели дава можност за управување со ризици кај тунели и воспоставување на база на податоци која ќе овозможи споредбена анализа на идни проекти. Со систематскиот пристап и користењето на напредни модели може значително да се намали веројатноста на несакани настани и да се зголеми предвидливоста и ефикасноста на проектите. Пристапот за управување со ризици може да се користи како поддршка при донесување на одлуки во сите фази на проектот – од планирање до експлоатација. Во фазата на проектирање, пристапот овозможува симулација на различни сценарија и оценување на нивната веројатност. Во текот на изградбата, може да се користи за следење на ризиците и нивно ажурирање според тековните мерења и настани. Со ова се овозможува навремено препознавање на неправилностите, како и отстапувања и имплементирање на соодветни корективни мерки. Во фазата на експлоатација, ваквиот пристап може да се примени како основа за одржување на безбедноста и планирање на интервенции.

При генералната анализа на вкупните трошоци за сите тунелски сегменти кои се проектирани според НАТМ, се јавуваат различни вредности на дополнителни трошоци при различни сценарија. Притоа, најризичното сценарио е проценетите сегменти со висок и среден ризик, максимално да ги надминат трошоците за главните тунелски работи. Оваа анализа може и подетално да се прошири од економски аспект, со крајна цел да се одреди дали трошоците се во прифатливи граници пред да се започне со изградбата.

Иако моделите даваат конзистентни резултати, се јавуваат и одредени ограничувања. Дел од влезните податоци се базирани на секундарни извори и експертски процени, што внесува одреден степен на субјективност. Дополнително, трудот не ги разгледува социјалните и еколошки ризици, кои можат да влијаат на успешноста на проектот, особено во контекст на реалните финансиски и организациони ограничувања. Секако при управувањето со ризици, постои и катастрофално сценарио, каде што проценетите ризици, односно во овој случај учеството во одредена категорија се менува кон „полошите“ категории и доаѓа до намалување на ризиците каде што не се потребни никакви мерки. Во поголем број случаи во тунелските проекти има тенденција да се

намалат ризиците, па затоа ова сценарио најчесто има многу мала веројатност на појава и не се истражува дополнително, освен доколку не се процени некоја екстремно неприфатлива последица.

Во поширок контекст, истражувањето укажува на потребата од воспоставување на национална рамка за управување со ризици кај подземните конструкции. Во моменталната пракса, недостасува единствена методологија и стандарди кои би обезбедиле споредливост на резултатите од различни проекти. Развиениот модел претставува можен темел за создавање таков систем, кој би ги обединил најдобрите меѓународни практики со домашните искуства. Со тоа се создава можност за воспоставување централизирана база на податоци за ризици, која би се користела при идните проекти за подобра процена и планирање.

Интеграцијата на класичните инженерски методи со современите машински пристапи, создава нова димензија во управувањето со ризици. Овој пристап овозможува не само повисока прецизност во процената, туку и создавање на интелегентни системи кои учат, се адаптираат и предвидуваат. Примената на вакви методи ја подигнува тунелградбата на повисоко ниво на технолошка зрелост и создава услови за развој на национални стандарди, насочени кон безбедност, одржливост и ефикасност.

8. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ

Зголемените барања на жителите во модерниот свет поставуваат нови предизвици пред градежното инженерство. Потребата од поврзување, побрз и поефикасен транспорт, подигнување на свеста за животната средина, зголемување на безбедноста и генерално поквалитетен живот се дел овие барања, кои секогаш треба да се имаат во предвид. Подземните конструкции како дел од ова модерно општество, имаат голем број на предности, но секогаш се проследени со несигурности. Во секоја фаза од тунелските проекти, несигурностите влијаат на одлуките кои треба да бидат превземени. За соодветно справување со несигурностите и предизвиците на овие конструкции, потребни се пристапи кои се разликуваат од класичните инженерски методи. Сите проблеми околу несигурностите, непосакуваните настани, безбедноста и сигурноста на луѓето се третираат во областа на управување со ризиците.

Ограниченото знаење што постои за условите под теренот само по себе го предизвикува ризикот кај подземните конструкции. Иако повеќето од тунелите се изградени и функционираат безбедно или со одредени мали неправилности, постојат и одреден број на проекти каде се појавиле инциденти кои резултирале со економски и временски загуби, негативни влијанија врз животната средина, човечки повреди, па дури и загуба на живот. Бидејќи постои тенденција да се зголеми изградбата на повеќе тунели во иднина, очекувано е дека појавата на ризици ќе биде почеста. Во таа насока, оваа проблематика треба повеќе да се истражува и усоврши, со цел да се поедностави и зачести користењето на моделите и анализите за управување со ризиците.

Овој труд го проширува научното разбирање за динамиката на ризиците, прикажувајќи дека ризикот не е статичен феномен, туку еволуира со текот на времето и со промените во околностите.

Во ова истражување е прикажан систематски пристап на управување со ризиците при реализација на проекти за тунели, чија цел е обединување на класичните инженерски методи со современите аналитички техники, овозможувајќи повисоко ниво на сигурност и предвидливост во различни проектни фази.

8.1 Примена на моделите при управување со ризици кај нови проекти за тунели

Предложените модели за управување со ризици овозможуваат примена во различни проектни фази кај нови тунели. Пожелно е управувањето да започне во почетните фази каде што се можни поголеми промени, а понатаму со различно ниво на деталност да продолжи како посебен дел од проектната документација. Целиот процес содржи неколку клучни елементи:

- Формирање на база на податоци која ќе содржи релевантни податоци и ќе ја прикаже секоја промена од геометриски, геолошки, конструктивен и технолошки аспект. Се препорачува базата да содржи повеќе сегменти (тунели) со цел моделите да добијат подобра подлога за учење и предвидување. Може да се користат и постоечки (изградени) тунели со слични карактеристики и да се добие еден вид на повратна анализа во следните чекори. Треба да се посвети внимание

при дефинирање на одредени податоци кои немаат експлицитна нумеричка вредност, како истражните дупнатини, раседите, влијанието од минирање и подземна вода. Во оваа дисертација, тие вредности претставуваат застапеност во однос на целата должина на тунелот или сегментот.

- Прелиминарната анализа генерално служи за разработка на базата на податоци и селекција на конкретни влезни податоци во моделите. Кај ова истражување дел од податоците се елиминирани поради нивна мала или несоодветна корелација. Во оваа анализа треба да се одреди како и на кој начин ќе се дефинираат хазардите и ризиците, односно дали тие ќе имаат квалитативна или квантитивна форма. Притоа треба да се одлучи и од кој аспект ќе се разгледува ризикот, дали само како веројатност на појава и/или влијание врз одредени цели врз проектот (најчесто трошоци и време). Во почетните проектни фази, оваа анализа може да биде доволна за процена на ризиците без дополнителни модели и превентивни мерки.
- Моделите за учење и предвидување на ризиците може да се користат на два начини, посебно или комбинирано во зависност дали претходно се проценети ризиците. Првиот пристап нуди можност за поделба на сегменти со слични карактеристики и нивно класифицирање според ризични нивоа, додека вториот пристап учи и предвидува според претходно дефинирани квантитативни или квалитативни (дискретизирани) ризици. Се препорачува комбинираниот пристап, при што првично се одредуваат сегментите со слични карактеристики, а потоа се проценуваат ризичните нивоа, каде покрај машинското учење се применува и експертско мислење.
- Со добиените резултатите од моделите се прави евалуација на ризиците и се предложуваат најсоодветните мерки за намалување на влијанието на ризиците. Во ова истражување на крајот е направена анализа од аспект на дополнителни трошоци во однос на вкупните, со целосно прифаќање на ризиците без дополнителни мерки. Ова може да служи и за споредба со предложените мерки, со цел да се провери нивната ефективност и економска оправданост.

Ваквиот процес на управување со ризиците овозможува да се проценат непланираните трошоци или време за реализација на проектите за тунели. Во ова истражување, резултатите од првата делница која е во изградба може да служат како основа за подобрување на проектите кај следните две железнички делници кои треба да се градат на Коридор 8. Ова претставува најсоодветна примена на овие модели, каде што се разработуваат повеќе тунели кои се дел од иста или слична делница. Овој пристап може да најде примена и кај останати тунелски проекти во државата и регионот, но релевантната база на податоци која континуирано ќе се дополнува и ажурира е клучен елемент за развивање на добри модели кои ќе ја рефлектираат реалноста.

8.2 Ограничувања

Овие модели и базата на податоци се фокусирани само на едноколосечни железнички тунели на три делници во нашата држава и веќе изработена проектна документација на ниво на основни проекти. Притоа во предвид се земени само сегменти кои се проектирани според НАТМ. Со ова се ограничува способноста моделите да опфатат

други типови на тунели кои имаат различни услови и/или карактеристики од аспект на геометрија, геологија, подградба и технологија на градење.

Бројот на влезни податоци, односно 341 сегмент, во рамки на машинското учење се смета како средна до мала база, што теоретски значи дека при поголем број на податоци може да се добијат подобри и поточни модели. Но тоа не е секогаш случај, бидејќи зависи и од квалитетот на податоците, кои ако се добро структурирани и проследени со експертско знаење може да дадат добри резултати. Квалитетот на податоците и експертското знаење во нашата држава може да имаат ограничувачки карактер, имајќи ги во предвид специфичностите и реткоста на овие проекти, како и лимитираниот број на експерти од оваа област.

Геолошките податоци како највлијателни фактори, понекогаш е потребно да се калибрираат, а во одредни случаи да се додадат повеќе параметри за да може подобро да се опише локалната геолошка средина. Ова асоцира на очигледните мерки со зголемување на бројот на теренски истражувања во зона на тунелите, што според досегашната пракса е еден од главните ограничувачки фактори во однос на квалитетот на податоците. Технологијата на градење директно влијае на подградбата и ризиците, односно механизмите за настанување на хазард и лом се разликуваат кај одредени методи, па затоа влезните податоци кои се прикажани во ова истражување може да бидат недоволни или несоодветни за анализа, како на пример кај проекти каде се користат ТБМ машини. Минирањето е земено во предвид преку факторот на пореметување кај одреден дел од сегментите каде што неговата појава е сигурна, но кај останатите сегменти, како што потврдија резултатите при изведба има голема веројатност да се јави потреба од минирање, иако не е дел од проектната документација. Ова иницира дополнителни промени во трошоците и времето за изградба.

Сепак повеќето од овие ограничувања може да се надминат со проширување на базата на податоци и одредени модификации во самите модели, со што овој процес за управување со ризици би можел да се користи кај сите тунелски проекти во различни региони и теренски услови.

8.3 Заклучоци

Иако според прикажаното во светски рамки, тенденцијата е да се реагира само во случај на појава на несигурности и неочекувани настани, кај проектите за тунели се повеќе применуваат управување со ризици како превентива за непосакувани последици. Во тој контекст наведува и мониторингот на ризици, кој е често најзапоставен дел на управувањето, а може да обезбеди вредни информации во целиот животен циклус на проектот. Дури и класичниот мониторинг на подземните конструкции кој во нашата држава не се применува задолжително, може да послужи за првична идентификација на ризици и континуирано зголемување на базата на податоци која ќе може да се користи за постоечки и идни проекти.

Трудот создава нова научна парадигма во инженерската анализа на ризици – насочена кон интелегентно, предиктивно и податочо ориентирано инженерство, каде што одлуките се носат врз основа на статистички и логички докази, а не генерално на интуиција или искуство.

Развиениот модел овозможува да се врши процена на ризици на структурирана и квантитативна основа. Со тоа се зголемува транспарентноста во донесувањето на одлуки и се овозможува пообјективна комуникација меѓу сите засегнати страни во проектот.

Од научен аспект, досега не се моделирани вакви „класични“ проектни податоци со цел да се употребат во управувањето со ризици. Тоа претставува можност за полесно користење на традиционалните, како и развивање на нови пристапи кои се базираат на машинско учење и вештачка интелигенција. Со вака дефинирана база на податоци се потврдува првата хипотеза, дека може да се применат веќе постоечки (стандардни) проектни податоци при процена на ризиците.

Ова истражување интегрира повеќе аналитички, теоретски и практични концепти во унифициран систем за управување со ризици во тунелоградбата. Тоа претставува чекор во воведувањето на квантитативни, Бајесови и интелигентни модели за анализа на ризици кај проектите за тунели во нашата држава. Ваквиот пристап ја премостува празнината меѓу класичниот инженерски пристап и современите методи на вештачка интелигенција и машинско учење. Овој начин на работа досега не е применуван за тунелски сегменти проектирани според НАТМ.

Моделите со кластеризација ја потврдуваат втората хипотеза, со што ризиците може да се проценат и без нивно претходно дефинирање.

Бајесовите мрежи овозможуваат теоретски да се моделира еволуцијата на ризиците преку условни веројатности и ажурирање на податоците. Со тоа, може да се развиваат динамички модели за инженерска одлука и надвор од тунелоградбата.

Воспоставувањето на нова класификација на ризиците, заснована на интеграција на геолошки, технолошки и конструктивни параметри овозможува попрецизна категоризација на ризиците и полесно донесување на инженерски одлуки, особено при избор на метод на ископ, тип на подградба и приоритизација на заштитни мерки.

Истражувањето ја проширува примена на ALARP концептот во контекст на подземната градба, при што е дефиниран начин за балансирање на прифатливиот ризик со економските ограничувања на проектот. Со ова се обезбедува нов теоретски пристап за оценување на прифатливоста на ризикот во инженерството, што може да се користи како основа за развој на национални стандарди.

Од методолошки аспект, трудот воспоставува систем кој ја премостува разликата меѓу детерминистички и стохастички анализи. Преку комбинирањето на веројатносни пресметки, Бајесово резонирање и предиктивни модели на машинско учење, се создава нов вид интегриран систем способен за адаптација, самообука и ажурирање во реално време, со што се потврдува третата хипотеза. Тоа претставува иновативен научен пристап кој го надминува традиционалниот модел на анализа базиран на фиксни претпоставки. Притоа се врши и анализа на различни сценарија во кои се разгледува како ризикот влијае на влезните податоци.

Ваквото управување со ризици практично може да се примени кај инфраструктурни делници, каде се појавуваат повеќе тунели и каде моделите може да учат и тестираат податоци од различни сегменти. Со ова може подобро да се

контролираат ризиците и да се види ефектот од предложените мерки. Доколку има недостаток на податоци или многу мала база, може да се искористат постоечките (веќе изградени) тунели, односно проектите на изведена состојба. Применливоста на вакви модели води кон подобрувањето на безбедноста и одржливоста на тунелите. Ризиците можат да се предвидат и контролираат уште во почетните фази, што значително го намалува бројот на несакани настани, времето на застој и трошоците за санација. Со тоа, се придонесува не само за техничка, туку и за социјална и економска стабилност во инфраструктурните инвестиции. Квантитативната форма на резултатите овозможува да се одреди застапеноста на сегментите во различни ризични категории, а со тоа да се направи конкретна евалуација во однос на одредени последици како трошоци и време. Ова ги потврдува четвртата и петтата хипотеза.

Со примена на овој модел може да се постигне економска оптимизација. Преку рационално користење на ресурси, селективно подобрување на подградбата и фокусирање на критичните зони, се намалуваат вкупните трошоци без компромис на безбедноста. Тоа овозможува поефикасно планирање на буџетите и подобра распределба на финансиските резерви.

Моделот создава основа за развој на национална стратегија за управување со ризици во инфраструктурни проекти. Со неговата примена, државните институции, јавните претпријатија и градежните компании би можеле да воспостават единствен систем за процена и следење на ризици. Тоа би овозможило подобра координација меѓу различни проекти, побрзо идентификување на критични состојби и подобра планирање на превентивни мерки.

Пристапот со одредена адаптација би можел да се интегрира со дигитални технологии – сензори, уреди, BIM (Building Information Modeling) и дигитални близнаци (Digital Twin). Со тоа, моделот може да биде поврзан со реални мониторинг системи, што ќе овозможи динамичка процена на ризици во реално време. Ова е особено важно за современото градежништво, каде дигитализацијата станува стандард, а податоците се основа за управување со безбедноста.

Со комбинирање на квантитативните, Бајесовите и интелегентните модели се поставува темелот на нов, предиктивен пристап во инженерската анализа и одлучување. Овој труд покажува дека управувањето со ризици е корисен дел од инженерскиот проектирање и реализацијата на проектите.

Трудот обезбедува алатка за образовни и истражувачки цели. Моделот може да се користи како практичен пример во наставата и обука за управување со ризици и инженерска анализа, но и како основа за понатамошно развивање на платформи и апликации за предвидување на ризици.

Примената на предложениот модел овозможува создавање на култура на превенција и постојано подобрување, каде секој проект станува извор на нови податоци, знаење и искуства за идните генерации на инженери. Со тоа, истражувањето не само што ги надминува рамките на поединечен проект, туку и поставува насоки за долгорочен развој на одржлива, безбедна и интелегентна инфраструктура.

Од ова истражување се произлезени неколку научни трудови, кои се објавени во меѓународни списанија, конференции и симпозиуми:

1. Approach to risk analysis in railway tunnels (Gacevski, et al., 2022)
2. Application of failure mode and effect analysis for tunnel risk assessment (Zafirovski, Gacevski, Lazarevska, & Nedevska, 2022)
3. Assessment of risks in a road tunnel construction using tree analysis (Gacevski, Zileska Pancovska, & Lazarevska, 2022)
4. Quantitative time analysis: comparing two tunnel segments of equal length (Gacevski, Gjorgjevska, & Zafirovski, 2025)
5. Risk assessment of railway tunnel segments using machine learning models (Gacevski, Lazarevska, & Zafirovski, 2025)

8.4 Препораки

За понатамошен развој на инженерската пракса и за подобрување на системот за управување со ризици се препорачуваат следните активности:

- Воспоставување на национална методологија за управување со ризици. Потребно е државните институции во координација со приватниот сектор да развијат унифицирана рамка за процена и контрола на ризици кај тунели;
- Создавање на национална база на податоци, во која ќе се собираат релевантни информации од проектите. Ова ќе овозможи создавање на систем за машинско учење кој ќе го подобрува моделот со секој нов проект. Се препорачува оваа база да содржи податоци за секој тунел во државата, вклучувајќи ги и постоечките;
- Интеграција на Бајесови мрежи и машинско учење во инженерската пракса. Упторобата на ваквите методи и модели овозможуваат динамична процена на ризици во реално време и автоматизирано известување за критични параметри. Се препорачува да се користи комбинација на модели без и со претходно дефиниран ризик, односно можност да се разгледуваат параметрите кои влијаат на ризиците од различни аспекти со цел да се добијат резултати кои најсоодветно ќе ги отсликуваат реалните услови;
- Подобрување на образованието и обуката. Воведување на подетални предмети и одржување на обуки поврзани со управување со ризици, аналитички методи, машинско учење и дигитална трансформација во инженерството за тунели;
- Примена на други типови на договори за реализација на проектите за тунели. Вавкиот пристап со претходно изработен проект на чија основа работи изведувачот, не секогаш преставува најдобро решение, бидејќи голем дел од промените при изградба може потешко да се реализираат. Се препорачува да се разгледа алтернатива со можност за проектирање и изведување од страна на изведувачот;

- Развој на систем за мониторинг и дигитално управување. Интеграција на сензори, технологии и дигитални модели (Digital Twin) кои ќе овозможат континуирано следење на состојбата на тунелите и навремена интервенција при појава на ризик;
- Понатамошно научно истражување. Проширување на анализата со вклучување на социјални, организациони и еколошки фактори, како и тестирање на предложениот модел на различни тунелски проекти. Ваквите модели може да се разгледуваат врз основа на истиот тип на податоци, со нивна трансформација од аспект на трошоците и времетраењето на изградбата. На тој начин, целната променлива, односно ризикот, може да се изрази како конкретна квантитативна монетарна или временска вредност при целиот процес на управување. Друг аспект кој може да се истражува и често е користен во оваа област е функцијата на корисност (utility function), која зема предвид повеќе вредности за да се пресмета исходот кој е посакуван (препорачан) за оној кој одлучува.

Генералната препорака е да се преземат дополнителни (превентивни) мерки уште пред започнување на изградбата и да се оформи стратегија за управување со ризиците. Сето ова, треба да овозможи балансирање помеѓу трошоците за безбедност и прифатливото ниво на ризик.

9. РЕФЕРЕНЦИ

- Aggarwal, C. C., & Reddy, C. K. (2014). *Data Clustering: Algorithms and Applications*. Taylor & Francis Group, LLC.
- Alleman, G. B., & Quigley, J. M. (2024). *Risk Management* (1st изд.). Auerbach Publications. doi:10.1201/9781003425465
- Amadini, F., Flor, A., Secondulfo, M., Baliani, D., Cenera, F., Morgia, M. L., . . . Sassi, F. (2023). BBT, Lot Mules 2-3. Application of machine learning on TBM parameters for risk prediction tools. Bo G. Anagnostou, A. Benardos, & V. P. Marinos (Ур.), *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World: Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2023 (WTC 2023)* (срп. 2593-2600). CRC Press. doi:10.1201/9781003348030
- Amini, A., & Fazelinia, M. (2017, November). Risk assessment of Namaklan road tunnel using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). *Tunneling and Climate Change, 12th Iranian and 3rd Regional Tunnelling Conference*. Teheran.
- Antiga, A., Chiorboli, M., & Dotti, M. (2024). Risk management of tunnel projects: From qualitative to quantitative probabilistic risk analysis. Bo J. Yan, T. Celestino, M. Thewes, & E. Eberhardt (Ур.), *Tunnelling for a Better Life* (срп. 3572-3580). CRC Press. doi:10.1201/9781003495505
- Arbabsiar, M. H., Farsangi, M. A., & Mansouri, H. (2020). Fuzzy logic modelling to predict the level of geotechnical risks in rock Tunnel Boring Machine (TBM) tunnelling. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 35(2), 1-14. doi:10.17794/rgn.2020.2.1
- BayesFusion. (2024). *GeNIe Modeler*. User's Manual.
- Bergmeister, K. (2022). *Models for financing, cost, and risk assessment - Major railway tunnel projects in Europe*. Ernst & Sohn - Wiley.
- Bilgin, N., & Acun, S. (2024). *Practical Management of Tunneling with Tunnel Boring Machines*. CRC Press.
- Bilotta, E., Casale, R., Prisco, C. G., Miliziano, S., Peila, D., Pigorini, A., & Pizzarotti, E. M. (2022). *Handbook on Tunnels and Underground Works-Volume 2: Construction - Methods, Equipment, Tools and Materials*. CRC Press. doi:10.1201/9781003306467
- Binu, D., & Rajakumar, B. (2021). *Artificial Intelligence in Data Mining - Theories and Applications*. Academic Press, Elsevier.
- Borghetti, F., Cerean, P., Derudi, M., & Frassoldati, A. (2019). *Road Tunnels-An Analytical Model for Risk Analysis*. Springer. doi:10.1007/978-3-030-00569-6
- Chang, L., Nordin, N., Gu, X., & Zhao, Y. (2025). Risk assessment of existing buildings in tunnel construction based on an improved cumulative prospect theory method. *Science Progress*, 108(1), 1-39. doi:10.1177/00368504251320350

- DAUB-Working Group. (2022). *Recommendations for the Project Risk Management in Underground Construction*. German Tunnelling Committee (ITA-AITES).
- Dauwe, L., Fröhlich, B., & Weidinger, A. (2018). Risk management during construction of a new road tunnel crossing under a 150 year old railway tunnel. *ce/papers(2)*, 945-950. doi:10.1002/cepa.793
- Derudi, M., Borghetti, F., & Frassoldati, A. (2025). TRAM-R2: A Quantitative Model for Railway Tunnel Risk Analysis. *Chemical Engineering Transactions*, 117, 649-654. doi:10.3303/CET25117109
- Duan, B., Chu, A., Bu, L., Li, Z., & Long, K. (2025). Safety Risk Evaluation of Water and Mud Inrush in Karst Tunnel Based on an Improved Weighted Cloud Model. *Sustainability*, 17(20), 9328. doi:10.3390/su17209328
- Einstein, H. H., Indermitte, C., Sinfield, J., Descoedres, F. P., & Dudit, J.-P. (1999). Decision Aids for Tunneling. *Transportation Research Record*, 1656(1), 6-13. doi:10.3141/1656-02
- Eskesen, S. D., Tengborg, P., Kampmann, J., & Veicherts, T. H. (2004). Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19, 217-237.
- Ettouney, M. M., & Alampalli, S. (2017). *Risk Management in Civil Infrastructure*. Boca Raton: CRC Press.
- Eurostat. (2025). *Accidents at work - statistics by economic activity*. Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_-_statistics_by_economic_activity
- Fang, M., Zhang, Y., Zhu, M., & Chen, S. (2022). Cause Mechanism of Metro Collapse Accident Based on Risk Coupling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2102. doi:10.3390/ijerph19042102
- Fenton, N., & Neil, M. (2018). *Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks* (2nd изд.). Chapman and Hall/CRC. doi:10.1201/b21982
- Fu, H., Huang, Z., & Zhang, J. (2017). Risk Comprehensive Assessment of Shield Tunnel Construction Based on Cloud Theory. *Geo-Risk 2017 GSP 285*, (стр. 334-345).
- Gacevski, V., Gjorgjevska, S., & Zafirovski, Z. (2025). Quantitative time analysis: comparing two tunnel segments of equal length. *25 International Symposium of MASE*. Ohrid.
- Gacevski, V., Lazarevska, M., & Zafirovski, Z. (2025). Risk assessment of railway tunnel segments using machine learning models. *ITA Tunnelling Awards and the Southeastern Europe Tunnelling Conference (SETC-2025)*. Belgrade.
- Gacevski, V., Lazarevska, M., Zafirovski, Z., & Nedevska, I. (2021). An approach for tunnel risk management. *Scientific Journal of Civil Engineering (SJCE)*, 10(1).

- Gacevski, V., Zafirovski, Z., Lazarevska, M., Nedevska, I., Ristov, R., & Ognjenovic, S. (2022). Approach to risk analysis in railway tunnels. *19 International Symposium of MASE*. Ohrid.
- Gacevski, V., Zileska Pancovska, V., & Lazarevska, M. (2022). Assessment of risks in a road tunnel construction using tree analysis. *Scientific Journal of Civil Engineering*, *11*(1).
- Gattinoni, P., Pizzarotti, E. M., & Scesi, L. (2014). *Engineering Geology for Underground Works*. Springer.
- Gebremeskel, N. H., & Gebregziabher, H. F. (2021). Developing Guideline for Risk Management of Tunnel Construction in Ethiopia. *Open Journal of Safety Science and Technology*, *171-183*. doi:10.4236/ojsst.2021.114012
- Ghasemi, Y., Ardeshir, A., & Amiri, M. (2012). Risk Identification and Fault Tree Development of Urban Tunnel Projects. *Third International Conference on Construction in Developing Countries (ICCIDC-III)*. Bangkok.
- Givi, B. M., Akbarpour, A., Hashemi, Z., Jahromi, H. A., & Mousazadeh, S. (2023). Introducing the ATOM risk management methodology for managing risks in heavy subway projects – The middle section of the Tehran Metro L6 and Tehran-Eslamshahr subway phase 1. Bo G. Anagnostou, A. Benardos, & V. P. Marinos (Yp.), *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World: Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2023 (WTC 2023)*, (crp. 3437-3444). doi:10.1201/9781003348030
- Guo, Q., Amin, S., Wang, H., & Yan, H. (2023). Coupling Simulation of Human-Environmental Safety Risk Factors in Metro Construction – a Case Study of Rongjiazhai Station at Xi'an Metro Line 5 in China. *Journal of Construction Education and Research*, *20*(1), 26-42. doi:10.1080/15578771.2023.2179137
- Guo, Y., Zheng, J., Zhang, R., & Yang, Y. (2022). An evidence-based risk decision support approach for metro tunnel construction. *Journal of Civil Engineering and Management*, *28*(5), 377-396. doi:10.3846/jcem.2022.16807
- Hafner, M., Žibert, M., & Zorin, U. (2025). Challenges, solutions and measures in road tunnel risk management - a machine learning test. Bo F. Johansson, A. Ansell, D. Johansson, J. Funehag, & J. Norrman (Yp.), *Tunnelling into a Sustainable Future – Methods and Technologies: Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2025 (WTC 2025)* (crp. 4172-4179). CRC Press. doi:10.1201/9781003559047
- Haghshenas, S. S., Haghshenas, S. S., Abduelrhman, M. A., Zare, S., & Mikaeil, R. (2022). Identifying and Ranking of Mechanized Tunneling Project's Risks by Using A Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Technique. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, *6*(1), 29-45. doi:10.22115/scce.2022.305718.1366
- Han, B., Jia, W., Feng, W., Liu, L., Zhang, Z., Guo, Y., & Niu, M. (2023). Safety risk assessment of loess tunnel construction under complex environment based on game theory-cloud model. *Scientific Reports*, *13*(1), 12249. doi:10.1038/s41598-023-39377-y

- He, L., Tang, T., Hu, Q., Cai, Q., Li, Z., Tang, S., & Wang, Y. (2021). Integration of Interpretive Structural Modeling with Fuzzy Bayesian Network for Risk Assessment of Tunnel Collapse. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 7518284. doi:10.1155/2021/7518284
- Hemphill, G. B. (2013). *Practical Tunnel Construction*. John Wiley & Sons.
- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. Rocscience.
- HSE. (2001). *Reducing risks, protecting people-HSE's decision-making process*. Health & Safety Executive.
- Huang, Z., Yang, Z., Wu, Y., Ma, L., Sun, T., Wang, Z., . . . Zheng, Y. (2025). Improving a Prediction Model for Tunnel Water Inflow Estimation Using LSTM and Bayesian Optimization. *Water*, 17(21), 3045. doi:10.3390/w17213045
- Hyun, K.-C., Min, S., Choi, H., Park, J., & Lee, I.-M. (2015). Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 121-129.
- IEC/ISO31010. (2009). *Risk management - Risk assessment techniques*. International electrotechnical commission.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press.
- Isaksson, T., & Stille, H. (2005). Model for Estimation of Time and Cost for Tunnel Projects Based on Risk Evaluation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(5), 373-398.
- ISO3100. (2018). *Risk management - Guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization.
- ITA. (2015). *Strategy for Site Investigation of Tunnelling Projects*. ITA Working group 2.
- ITA-AITES, & IMIA. (2023). *A code of practice for risk management of tunnel works*. International Tunnelling and Underground Space Association (ITA-AITES) & International Association of Engineering Insurers (IMIA).
- Ji, C., Luo, D., Shen, X., Xu, L., Pan, H., & Liu, Y. (2025). Risk Assessment of Drilling and Blasting Method Based on Nonlinear FAHP and Combination Weighting. *Applied Sciences*, 15(8), 4239. doi:10.3390/app15084239
- Jovanovska, T., Togo, I., & Gacevski, V. (2019). One method for defining an acceptable level of risks in tunneling. *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Architecture and Civil Engineering*, 17(3), 315-325.
- Ju, S., Ou, G., Peng, T., Wang, Y., Song, Q., & Guan, P. (2025). Tunnel water inflow prediction using explainable machine learning and augmented partially missing dataset. *Frontiers in Earth Science*, 13. doi:10.3389/feart.2025.1590203

- Kantardzic, M. (2020). *Data Mining – Concepts, Models, Methods, and Algorithms – Third Edition*. IEEE Press; John Wiley & Sons.
- Karasan, A. (2022). *Machine Learning for Financial Risk Management with Python: Algorithms for Modeling Risk*. O'Reilly Media, Inc.
- Karunaratne, B. V., & Kim, B.-S. (2025). Developing a High-Risk Assessment Model for Tunnel Projects Based on Risk Parameters. *ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 11(4), 4025082. doi:10.1061/AJRU6.RUENG-1618
- Khodabakhshian, A. (2023). *Machine learning for risk management in construction projects*. Milano: Politecnico Milano1863.
- Kikkawa, N., Itoh, K., Hori, T., Toyosawa, Y., & Orense, R. P. (2015). Analysis of labour accidents in tunnel construction and introduction of prevention measures. *Industrial Health*, 53, 517-521. doi:10.2486/indhealth.2014-022
- Kitson, N. K., Constantinou, A. C., Guo, Z., Liu, Y., & Chobtham, K. (2023). A survey of Bayesian Network structure learning. *Artificial Intelligence Review*, 56(8), 8721-8814. doi:10.1007/s10462-022-10351-w
- Koohathongsumrit, N., & Meethom, W. (2024). Risk analysis in underground tunnel construction with tunnel boring machines using the Best–Worst method and data envelopment analysis. *Heliyon*, 10(1), 23486. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e23486
- Kwon, K., Kang, M., Shin, Y. J., Ahn, B., & Choi, H. (2025). An interpretable framework for risk management in TBM excavation using expert elicitation integrated with fuzzy set theory. *Sci Rep*, 15(1), 23030. doi:10.1038/s41598-025-07514-4
- Li, X., Sun, W., Fu, H., Bu, Q., Zhang, Z., Huang, J., . . . Shen, Y. (2024). Schedule risk model of water intake tunnel construction considering mood factors and its application. *Scientific Report*, 14, 3857. doi:10.1038/s41598-024-54261-z
- Liu, N., Guo, D., Song, Z., Zhong, S., & Hu, R. (2023). BIM-based digital platform and risk management system for mountain tunnel construction. *Scientific Reports*, 13(1), 7585. doi:10.1038/s41598-023-34525-w
- Liu, W., Zhao, T., Zhou, W., & Tang, J. (2018). Safety risk factors of metro tunnel construction in China: An integrated study with EFA and SEM. *Safety Science*, 105, 98-113. doi:10.1016/j.ssci.2018.01.009
- Lyu, H.-M., Sun, W.-J., Shen, S.-L., & Zhou, A.-N. (2020). Risk Assessment Using a New Consulting Process in Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(3), 4019112. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001757
- Mahmoodzadeh, A., Mohammadi, M., Daraei, A., Faraj, R. H., Omer, R. M., & Sherwani, A. F. (2020). Decision-making in tunneling using artificial intelligence tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103514. doi:10.1016/j.tust.2020.103514

- Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2013). *Handbook of Tunnel Engineering, Volume I: Structures and Methods*. Wilhelm Ernst & Sohn.
- Membah, J. F. (2016). *Parametric cost estimating and risk analysis of transportation tunneling projects*. PhD Thesis, North Dakota State University of Agriculture and Applied Science.
- Meyer, T., & Reniers, G. (2022). *Engineering Risk Management De Gruyter Graduate*. Walter de Gruyter GmbH.
- Mikaeil, R., Haghshenas, S. S., & Sedaghati, Z. (2019). Geotechnical risk evaluation of tunneling projects using optimization techniques (case study: the second part of Emamzade Hashem tunnel). *Natural Hazards*, 97(3), 1099-1113. doi:10.1007/s11069-019-03688-z
- Mohammadi, M. (2024). *Risk Management in Tunneling Project: Estimation and Planning*. PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Moller, N., Hansson, S. O., Holmberg, J.-E., & Rollenhagen, C. (2017). *Handbook of Safety Principles*. John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781119443070
- Olson, D. L., & Wu, D. (2020). *Predictive Data Mining Models – Second Edition*. Springer.
- Ouyang, J., HaijunWang, Wu, L., Zhang, K., & Xue, X. (2024). Construction monitoring and analysis of low mountain ridge tunnel. *Archives of Civil Engineering*, 2024. doi:10.24425/ace.2024.148929
- Pamukcu, C. (2015). Analysis and management of risks experienced in tunnel construction. *Acta Montanistica Slovaca*, 20(4), 271-281.
- Pan, Y., Zhang, L., Wu, X., & Skibniewski, M. J. (2020). Multi-classifier information fusion in risk analysis. *Information Fusion*, 60, 121-136. doi:10.1016/j.inffus.2020.02.003
- PMI. (2017). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)* (6th изд.). Project Management Institute, Inc.
- Ponnuswamy, S., & Victor, D. J. (2016). *Transportation Tunnels* (2nd изд.). CRC Press. doi:10.1201/b21639
- Popov, G., Lyon, B. K., & Hollcroft, B. (2021). *Risk Assessment: A Practical Guide to Assessing Operational Risks*. John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781119798323
- Providakis, S. (2021). *An integrated information modelling system for assessing urban geohazard risk*. University of Birmingham.
- Rabcewicz, L. v. (1948). *Austria Patent No. 165573*.
- Sanchez, L. R., & Bulla, D. A. (2025). Game model approach for effective risk management of the North Interceptor Medellin. Bo F. Johansson, A. Ansell, D. Johansson, J. Funehag, & J. Norrman (Yp.), *Tunnelling into a Sustainable Future – Methods and Technologies: Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2025 (WTC 2025)* (стр. 4464-4471). CRC Press. doi:10.1201/9781003559047

- Scutari, M., Graafland, C. E., & Gutiérrez, J. M. (2019). Who learns better Bayesian network structures: Accuracy and speed of structure learning algorithms. *International Journal of Approximate Reasoning*, 115, 235-253. doi:10.1016/j.ijar.2019.10.003
- Semerano, M., Chiriotti, E., Mercier, B., & Della Valle, N. (2012). EPB tunnelling with shallow cover under the historical Lavov Most (Lions bridge) in Sofia. *1st Eastern European Conference*. Budapest.
- Shan, F., He, X., Xu, H., Armaghani, D. J., & Sheng, D. (2023). Applications of Machine Learning in Mechanised Tunnel Construction: A Systematic Review. *Eng*, 4(2), 1516-1535. doi:10.3390/eng4020087
- Sharafat, A., Latif, K., & Seo, J. (2021). Risk analysis of TBM tunneling projects based on generic bow-tie risk analysis approach in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103860. doi:10.1016/j.tust.2021.103860
- Singh, B., & Goel, R. (2012). *Engineering Rock Mass Classification*. Butterworth-Heinemann, Elsevier.
- Smith, D. J. (2017). *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers* (Ninth изд.). Butterworth-Heinemann.
- Smith, N. J., Merna, T., & Jobling, P. (2006). *Managing risk in construction projects* (2nd изд.). Blackwell Science.
- Song, Z., Su, W., Tian, X., Zhang, Y., & Zhou, G. (2021). Risk Analysis of Tunnel Construction Scheme Change based on Field Monitoring and Numerical Analysis. *Advances in Civil Engineering*. doi:10.1155/2021/8888886
- Sousa, R. L. (2010). *Risk Analysis for Tunneling Projects*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Špačková, O. (2012). *Risk management in tunnel construction projects*. PhD Thesis, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering.
- Stille, H. (2017). *Geological Uncertainties in Tunnelling - Risk Assessment and Quality Assurance*. Sir Muir Wood lecture 2017, International Tunnelling and Underground Space Association (ITA).
- Strauss, A., Bien, J., Neuner, H., Corinna Harmening, C. S., Österreicher, M., Voit, K., . . . Bergmeister, K. (2020). Sensing and monitoring in tunnels testing and monitoring methods for the assessment of tunnels. *Structural Concrete*, 21, 1356-1376. doi:10.1002/suco.201900444
- Sun, H., Zhu, M., Dai, Y., Liu, X., & Li, X. (2024). Dynamic risk early warning system for tunnel construction based on two-dimensional cloud model. *Expert Systems with Applications*, 255, 124799. doi:10.1016/j.eswa.2024.124799

- Sun, J., Liu, B., Chu, Z., Chen, L., & Li, X. (2018). Tunnel collapse risk assessment based on multistate fuzzy Bayesian networks. *Quality and Reliability Engineering International*, 34(8), 1646-1662. doi:10.1002/qre.2351
- Sun, X., Wu, L., & Wu, D. (2025). Risk evaluation of metro tunnel shield construction based on game variable weight extension cloud theory. *Sci Rep*, 15, 18961. doi:10.1038/s41598-025-03345-5
- Sun, Y., Feng, X., & Yang, L. (2018). Predicting Tunnel Squeezing Using Multiclass Support Vector Machines. *Advances in Civil Engineering*, 4543984. doi:10.1155/2018/4543984
- Technical Committee C.4. (2013). *Risk evaluation, current practice for risk evaluation for road tunnels*. PIARC-World Road Association.
- Vanorio, G., & Mera, J. M. (2012). Methodology for risk analysis in railway tunnels using Monte Carlo simulation. *Computers in Railways XIII (WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 127)*.
- Wang, J. X. (2023). *What Every Engineer Should Know About Risk Engineering and Management* (2nd изд.). CRC Press. doi:10.1201/9781003371014
- Wang, J., Cao, A., Wu, Z., Sun, Z., Lin, X., Sun, L., . . . Long, Y. (2021). Dynamic Risk Assessment of Ultra-Shallow-Buried and Large-Span Double-Arch Tunnel Construction. *Applied Sciences*, 11(24), 11721. doi:10.3390/app112411721
- Wang, Q., Xiong, Z., Zhu, K., & Guo, P. (2023). Construction Safety Risks of Metro Tunnels Constructed by the Mining Method in Wuhan City, China: A Structural Equation Model-Fuzzy Cognitive Map Hybrid Method. *Buildings*, 13(5), 1335. doi:10.3390/buildings13051335
- Wang, Q., Zhang, J., Zhu, K., Guo, P., Shen, C., & Xiong, Z. (2023). The Safety Risk Assessment of Mine Metro Tunnel Construction Based on Fuzzy Bayesian Network. *Buildings*, 13(7), 1605. doi:10.3390/buildings13071605
- Wang, X., Lia, S., Xua, Z., Lic, X., Lina, P., & Lina, C. (2019). An interval risk assessment method and management of water inflow and inrush in course of karst tunnel excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, 103033. doi:10.1016/j.tust.2019.103033
- Wang, Z., Jiang, T., & Li, Z. (2024). Risk Assessment of Underground Tunnel Engineering Based on Pythagorean Fuzzy Sets and Bayesian Networks. *Buildings*, 14(9), 2897. doi:10.3390/buildings14092897
- Weber, P., & Simon, C. (2016). *Benefits of Bayesian Network Models* (Tom 2). ISTE Ltd. doi:10.1002/9781119347316
- Wen, R., Gao, D., Yang, W., & Mou, W. (n.d.). A study of digital quantitative evaluation system for the safety risk management in the construction activities of transportation hubs. In J. Yan, T. Celestino, M. Thewes, & E. Eberhardt (Ed.), *Tunnelling for a Better Life* (pp. 2972-2979). CRC Press.

- Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2017). *Data Mining – Practical Machine Learning Tools and Techniques – Fourth Edition*. Morgan Kaufmann, Elsevier.
- Working Group 2. (2011). *Monitoring and control in tunnel construction*. ITA (International Tunneling and Underground Space Association).
- Wu, B., Qiu, W., Huang, W., Meng, G., Huang, J., & Xu, S. (2022). Dynamic risk evaluation method for collapse disasters of drill-and-blast tunnels: a case study. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 19(1), 309-330. doi:10.3934/mbe.2022016
- Wu, P., Yang, L., Li, W., Huang, J., & Xu, Y. (2023). Construction Safety Risk Assessment and Early Warning of Nearshore Tunnel Based on BIM Technology. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1996. doi:10.3390/jmse11101996
- Xia, Y., Xiong, Z., Dong, X., & Lu, H. (2017). Risk Assessment and Decision-Making under Uncertainty in Tunnel and Underground Engineering. *Entropy*, 19(10), 549. doi:https://doi.org/10.3390/e19100549
- Xing, X., Zhong, B., Luo, H., Li, H., & Wu, H. (2019). Ontology for safety risk identification in metro construction. *Computers in Industry*, 109, 14-30. doi:10.1016/j.compind.2019.04.001
- Yang, B., & Chen, Y. (2025). Deep Learning Method for Real-time Risk Assessment of Tunnel Engineering. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2540792. doi:10.1142/S0129156425407922
- Yang, P., Zhou, J., Zhang, Y., Xu, C., Khandelwal, M., & Huang, S. (2025). Ground Settlement Prediction in Urban Tunnelling: Leveraging Metaheuristic-Optimized Random Forest Models. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50, 17025–17044. doi:10.1007/s13369-025-10062-8
- Yang, Y., Wang, Y., Easa, S. M., & Yan, X. (2022). Factors Affecting Road Tunnel Construction Accidents in China Based on Grounded Theory and DEMATEL. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 16677. doi:10.3390/ijerph192416677
- Yazdani-Chamzini, A. (2014). Proposing a new methodology based on fuzzy logic for tunnelling risk assessment. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(1), 82-94.
- Yoe, C. (2019). *Principles of Risk Analysis – Decision Making Under Uncertainty, Second Edition*. CRC Press.
- Yue, P., Shenwei, O., Limao, Z., Wenjing, Z., Xianguo, W., & Heng, L. (2019). Modeling risks in dependent systems: A Copula-Bayesian approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 416-431. doi:10.1016/j.res.2019.03.048
- Zafirovski, Z., Gacevski, V., Krakutovski, Z., Ognjenovic, S., & Nedevska, I. (2021). Methodology for tunnel risk assessment using fault and event tree analysis. *6th International Conference on Road and Rail Infrastructures – CETRA 2020**. Zagreb. doi:10.5592/CO/cetra.2020.1051

- Zafirovski, Z., Gacevski, V., Lazarevska, M., & Nedevska, I. (2022). Application of failure mode and effect analysis for tunnel risk assessment. *Fifth symposium of the Macedonian Association for Geotechnics*. Ohrid.
- Zafirovski, Z., Gacevski, V., Lazarevska, M., & Ognjenovic, S. (2019). Procedures for risk analysis and management in tunnelling projects. *E3S Web of Conferences* , 135. doi:10.1051/e3sconf/201913501001
- Zafirovski, Z., Moslavac, D., Glavinov, A., Krakutovski, Z., & Gacevski, V. (2019). Guidelines for risk analysis and management in tunneling. *Scientific Journal of Civil Engineering (SJCE)*, 8(1).
- Zhang, J., Kong, G., Chen, A. P., & Zhang, Y. (2024). Risk Assessment of Immersed Tube Tunnel Engineering Based on Bayesian method. *International Conference on Smart Transportation and City Engineering (STCE 2023)*. Chongqing. doi:10.1117/12.3024760
- Zhang, L., Wang, Y., & Wu, X. (2021). Cluster-based information fusion for probabilistic risk analysis in complex projects under uncertainty. *Applied Soft Computing Journal*, 104, 107189. doi:10.1016/j.asoc.2021.107189
- Zhang, M., Yu, D., Wang, T., & Xu, C. (2023). Coupling Analysis of Tunnel Construction Safety Risks Based on N-K Model and SD Causality Diagram. *Buildings*, 13(4), 1081. doi:10.3390/buildings13041081
- Zhao, F., Xue, Y., Li, Y., & Zhao, H. (2017). A Risk Assessment System for Hard Rock TBM Selection Based on Bayesian Belief Networks (BBN). *Geo-Risk 2017*, (crp. 454-467). doi:10.1061/9780784480724.041
- Zhao, H., Wang, Y., Li, X., Guo, P., & Lin, H. (2023). Prediction of Maximum Tunnel Uplift Caused by Overlying Excavation Using XGBoost Algorithm with Bayesian Optimization. *Applied Sciences*, 13(17), 9726. doi:10.3390/app13179726
- Zhou, H. (2023). *Learning Data Mining Through Excel - A Step-by-Step Approach for Understanding Machine Learning Methods*. Apress, Berkeley, CA. doi:10.1007/978-1-4842-5982-5
- Zhou, R., Fang, W., & Wu, J. (2020). A risk assessment model of a sewer pipeline in an underground utility tunnel based on a Bayesian network. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103473. doi:10.1016/j.tust.2020.103473
- Zhu, C., Huang, X., Xu, C., Yan, G., Guo, J., & Liang, Q. (2025). Displacement Response Characteristics and Instability Risk Assessment of Excavation Face in Deep-Buried Shield Tunnel. *Buildings*, 15(14), 2561. doi:10.3390/buildings15142561
- Гацевски, В., Недевска, И., Лазаревска, М., & Зафировски, З. (2021). Методологија за процена на ризици кај постоечки хидротехнички тунели. *5ти Конгрес за брани*. Струга.

Зафировски, З. (2014). *Пробабилитетски преглед за дефинирање на својства на карбонатна маса при напонско-деформациони анализи кај тунели*. Докторска дисертација, Скопје.

ЈПМЖ-Инфраструктура. (2015-2017). Основни проекти за тунели на Железнички Коридор VIII.

МЗЗПР. (2010-2024). *Годишни извештаи за заштита при работа*. Македонско Здружение за Заштита При Работа.

10. ПРИЛОЗИ

10.1 База на податоци со сегменти проектирани според НАТМ и главните компоненти (влезни податоци) за анализа

РИЗИК	0,002						0,003						0,005						0,004						0,006											
	28	27	26	25	24	23	28	27	26	25	24	23	28	27	26	25	24	23	28	27	26	25	24	23	28	27	26	25	24	23	28	27	26	25	24	23
Вода	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Минн.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Чекор	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	
ФБО	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	
Цев.чад.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Чело	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Ремен.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	261,62	351,79	351,79	351,79	351,79	351,79	351,79	351,79	351,79	351,79	351,79	261,62	261,62	261,62	261,62	261,62	261,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
AM	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	86,71	171,54	171,54	171,54	171,54	171,54	171,54	171,54	171,54	171,54	171,54	86,71	86,71	86,71	86,71	86,71	86,71	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	44,26	
ПБ	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	4,10	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	
Анкери	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	18,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	
Раседи	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
UCS	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
GSI	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	
ROD	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	
RMR	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	
σ_{cm}	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	11,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
E _{тп}	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	3100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	
Агол вт.	59	53	59	48	45	45	48	45	45	45	45	45	48	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	
Кохез.	150	300	150	250	100	100	250	100	100	100	100	100	250	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
Вол. те.	26	26	26	25	21	21	25	21	21	21	21	21	25	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
Истр.	0,004	0,004	0,004	0,004	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	
Повр.	54,20	54,20	54,20	55,60	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	66,40	55,60	55,60	55,60	55,60	55,60	55,60	
Радиус	0	500	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	700	700	700	700	700	700	500	500	500	500	500	500	
Наклон	13,50	13,50	13,50	9,70	9,70	10,10	9,70	9,70	10,10	10,10	10,10	10,10	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,03	9,03	9,03	9,03	9,03	9,03	
Надслој	30	78	30	12	35	35	12	35	35	35	35	35	12	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	80	80	80	80	80	80	32	32	32	32	32	32	
Долж.	55,64	270,00	173,36	40,56	45,00	68,96	40,56	45,00	68,96	68,96	68,96	68,96	40,56	45,00	68,96	68,96	68,96	68,96	68,96	68,96	68,96	68,96	68,96	357,00	357,00	357,00	357,00	357,00	357,00	197,79	197,79	197,79	197,79	197,79	197,79	
Сер. бр.	1	2	3	4	5	6	4	5	6	6	6	6	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	
Тун. бр.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Општи	1						2						3						4																	

РИЗИК	Технологија на изградба																												
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Чело	Ремен.	АМ	ПБ	Анкери	Раседи	UCS	GSI	ROD	RMR	σ_{cm}	E _{тп}	Агол вт.	Кохез.	Вол. те.	Истр.	Повр.	Радиус	Наклон	Надслој	Долж.	Сер. бр.	Тун. бр.	
29	0,003	0,002	0,003	0,300	0,100	0,050	0,005	0,007																					
28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0																					
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0																					
26	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,50	2,00	2,50																					
25	7,10	7,10	8,33	8,82	8,82	8,33	8,33	8,33																					
24	0	0	0	0	0	0	0	0																					
23	0,52	0,79	0,79	0,79	0,79	0,64	0,79	0,64																					
22	0,00	0,00	125,38	144,57	171,70	0,00	125,38	0,00																					
21	61,38	61,38	122,77	164,93	165,48	61,38	122,77	61,38																					
20	2,00	3,01	4,01	5,39	6,76	3,00	4,01	3,00																					
19	9,00	13,00	15,50	22,00	35,50	10,50	15,50	10,50																					
18	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0																					
17	25	25	20	10	10	20	20	20																					
16	54	54	50	30	30	50	50	50																					
15	87	87	87	87	87	87	87	87																					
14	67	67	51	21	21	51	51	51																					
13	4,0	4,0	3,0	0,9	0,9	3,0	3,0	3,0																					
12	2600	2600	2000	300	300	2000	2000	2000																					
11	53	53	30	20	20	30	30	30																					
10	100	100	150	50	50	150	150	150																					
9	26	26	26	23	23	26	26	26																					
8	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003																					
7	55,60	55,60	55,00	56,00	61,00	54,00	55,00	54,00																					
6	900	900	900	900	900	900	900	900																					
5	3,90	3,90	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41																					
4	20	20	10	15	25	50	80	115																					
3	20,00	15,00	50,30	20,00	17,00	50,00	72,00	276,00																					
2	17	18	19	20	21	22	23	24																					
1																													

8

РИЗИК	0,002		0,004		0,001		0,001		0,001		0,001		0,003		0,002	
	28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Технологија на изградба	Вода	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Минн.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Чекор	3,00	2,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	3,00	2,50	3,00	2,50	3,00	2,50	2,50
ФБО	7,10	8,33	8,33	8,33	7,10	7,10	7,10	8,33	7,10	8,33	7,10	8,33	7,10	7,10	7,10	7,10
Цев.чад.	0	0	18	18	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0
Чело	0,54	0,64	1,18	1,18	0,00	0,00	0,00	1,58	0,54	0,64	0,54	0,64	0,54	0,64	0,64	0,64
Ремен.	0,00	0,00	127,38	121,50	121,50	121,50	254,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
АМ	61,38	61,38	122,77	42,53	42,53	42,53	122,77	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38
ПБ	2,00	3,00	4,01	4,00	4,00	4,00	4,01	4,01	2,01	3,01	2,01	3,01	2,01	3,01	3,01	3,01
Анкери	5,00	10,50	16,00	14,00	14,00	14,00	12,00	4,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Раседи	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
UCS	30	20	20	20	20	20	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
GSI	70	50	50	54	54	54	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
ROD	87	87	87	92	92	92	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
RMR	71	51	51	67	67	67	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
σ_{cm}	7,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
E _{тп}	7000	2000	2000	2100	2100	2100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Агол вт.	40	30	30	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Кохез.	300	150	150	100	100	100	60	60	60	60	60	60	60	60	60	120
Вол. те.	26	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Истр.	0,003	0,003	0,003	0,010	0,010	0,014	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Повр.	53,00	54,00	56,00	55,60	55,60	55,60	60,00	53,00	54,00	54,00	54,00	54,00	54,00	54,00	54,00	54,00
Радиус	0	0	0	600	600	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Наклон	3,41	3,41	3,41	14,90	15,00	15,00	15,00	14,14	14,14	14,14	14,14	14,14	14,14	14,14	14,14	14,14
Надслој	60	20	10	12	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	40
Долж.	74,00	15,00	10,20	75,00	67,30	10,00	10,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	59,00
Сер. бр.	25	26	27	28	29	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	32
Тун. бр.	1			11	12		13									
Општи																

РИЗИК	Технологија на изградба							
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Џело	Ремен.	АМ
29	0,050	0,003	0,007	0,006	0,350	0,006	0,007	0,003
28	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	1,00	1,00	1,50	1,00	1,50	1,00	1,50	1,00
25	8,82	8,33	8,33	8,82	8,33	8,82	8,33	8,33
24	30	30	0	0	0	0	0	30
23	1,58	1,58	1,05	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58
22	254,76	254,76	139,08	254,76	254,76	254,76	254,76	254,76
21	164,93	122,77	61,38	164,93	122,77	164,93	122,77	122,77
20	5,39	4,01	3,01	5,39	4,01	5,39	4,01	4,01
19	24,00	24,00	17,50	26,00	17,50	26,00	17,50	24,00
18	0,4	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
17	6	10	10	10	10	10	10	10
16	27	22	22	22	22	22	22	22
15	38	25	25	25	25	25	25	25
14	29	27	27	27	27	27	27	27
13	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
12	400	350	350	350	350	350	350	350
11	35	40	40	38	40	38	40	40
10	20	20	20	30	20	30	20	20
9	26	26	26	26	26	26	26	26
8	0,005	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
7	60,00	56,00	55,00	60,00	55,00	60,00	55,00	56,00
6	600	600	600	600	600	600	600	600
5	13,89	13,89	13,89	13,89	14,81	14,81	14,81	14,81
4	15	10	17	17	10	13	10	10
3	10,00	10,00	6,00	56,00	29,00	24,00	9,00	10,00
2	41	42	43	44	45	46	47	48
1					15			

Општи	Тун. бр.	1		2							
		1	2	1	2						
РИЗИК	29	0,002	0,003	0,001	0,050	0,002	0,010	0,003	0,001		
	Вода	28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Технологија на изградба	Минн.	27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
	Чекор	26	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00	
Подградба	ФБО	25	7,10	7,10	7,10	8,82	7,10	7,10	7,10	7,10	
	Цев.чад.	24	20	0	20	20	20	20	20	0	20
Геолошко-геотехнички	Цело	23	1,61	0,52	1,61	1,84	1,61	1,61	1,61	0,52	1,61
	Ремен.	22	620,00	0,00	620,00	1121,00	620,00	620,00	620,00	0,00	620,00
Геометриски	AM	21	62,52	42,85	62,52	172,46	62,52	62,52	62,52	42,85	62,52
	ПБ	20	3,04	2,02	3,04	10,27	3,04	3,04	3,04	2,02	3,04
Општи	Анкери	19	0,00	0,00	0,00	25,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Раседи	18	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
Геолошко-геотехнички	UCS	17	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	GSI	16	28	45	28	15	28	28	28	45	28
Геолошко-геотехнички	ROD	15	36	36	36	36	36	34	34	34	34
	RMR	14	33	50	33	18	33	33	33	50	33
Геолошко-геотехнички	σ_{cm}	13	1,8	3,0	1,8	0,2	1,8	1,8	1,8	3,0	1,8
	E _{pm}	12	500	2500	800	80	500	500	500	2500	500
Геолошко-геотехнички	Агол вт.	11	43	45	38	25	43	43	43	45	43
	Кохез.	10	80	200	80	40	80	80	80	200	80
Геолошко-геотехнички	Вол. те.	9	26	26	26	23	26	26	26	26	26
	Истр.	8	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,014	0,014	0,014	0,014
Геометриски	Повр.	7	55,23	54,21	55,23	66,40	55,23	55,23	55,23	54,21	55,23
	Радиус	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Геометриски	Наклон	5	8,80	8,80	8,80	8,80	8,38	8,80	8,80	8,80	8,80
	Надслој	4	20	39	39	39	20	10	18	18	18
Општи	Долж.	3	12,00	119,50	42,68	8,54	12,00	12,00	12,00	35,06	26,30
	Сер. бр.	2	49	50	51	52	53	54	54	55	56
Тун. бр.	1	1						2			

РИЗИК	Технологија на изградба							Општи
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Чело	Ремен.	
29	0,008	0,010	0,005	0,003	0,090	0,005	0,008	0,015
28	0,0	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
26	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00
25	7,10	14,22	14,22	14,22	21,93	14,22	7,10	7,10
24	20	55	0	55	41	55	20	0
23	1,61	4,31	1,41	4,31	5,42	4,31	1,61	0,52
22	620,00	709,15	0,00	709,15	1368,1	709,15	620,00	0,00
21	62,52	81,98	56,33	81,98	334,16	81,98	62,52	42,85
20	3,04	4,00	2,66	4,00	15,85	4,00	3,04	2,02
19	0,00	0,00	0,00	0,00	42,00	0,00	0,00	0,00
18	0,2	0,1	0,0	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0
17	25	25	25	25	25	25	25	25
16	28	28	45	28	15	28	28	45
15	50	34	34	34	34	34	48	48
14	33	33	50	33	20	33	33	50
13	1,8	1,8	3,0	1,8	0,2	1,8	1,8	3,0
12	500	500	2500	500	80	500	500	2500
11	43	43	50	43	25	43	43	45
10	80	80	150	80	40	80	80	200
9	26	26	26	26	23	26	26	26
8	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,008	0,008
7	55,23	108,64	107,30	108,64	136,60	108,64	55,23	54,21
6	1000	0	0	0	0	0	500	500
5	8,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	8	9	18	18	18	14	8	15
3	12,00	12,00	57,94	11,59	7,73	12,00	12,00	30,45
2	73	74	75	76	77	78	79	80
1				6			7	

Општи	Технологија на изградба									
	РИЗИК	29	0,012	0,550	0,008	0,013	0,012	0,011	0,310	0,050
	Вода	28	0,2	0,3	0,1	0,4	0,2	0,3	0,4	0,6
	Минн.	27	0,7	0,7	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,2
	Чекор	26	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00
	ФБО	25	7,10	8,82	7,10	8,02	8,02	8,02	10,08	8,02
	Цев.чад.	24	20	20	20	30	0	30	24	31
	Цело	23	1,61	1,84	1,61	2,13	2,09	2,13	2,77	2,26
	Ремен.	22	620,00	1121,00	620,00	600,00	0,00	600,00	1200,00	608,00
	АМ	21	62,52	172,46	62,52	69,34	47,64	69,34	250,00	138,74
	ПБ	20	3,04	10,27	3,04	3,38	2,25	3,38	12,46	6,83
	Анкери	19	0,00	25,50	0,00	0,00	0,00	0,00	18,00	13,50
	Раседи	18	0,0	1,0	0,1	0,1	0,0	0,0	1,0	0,0
	UCS	17	25	25	25	25	25	25	25	25
	GSI	16	28	15	28	28	45	28	15	45
	ROD	15	48	48	48	44	44	44	44	44
	RMR	14	33	20	33	33	50	33	20	50
	σ_{cm}	13	1,8	0,2	1,8	1,8	3,0	1,8	0,2	3,0
	Етп	12	500	80	500	500	2500	800	80	2500
	Агол вт.	11	43	25	43	43	45	38	25	45
	Кохез.	10	80	40	80	80	200	80	40	200
	Вол. те.	9	26	23	26	26	26	26	23	26
	Истр.	8	0,008	0,008	0,008	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
	Повр.	7	55,23	66,40	55,23	69,25	68,12	69,25	81,37	72,70
	Радиус	6	500	500	500	500	500	0	0	0
	Наклон	5	0,00	0,00	0,00	16,00	16,00	16,00	16,00	17,66
	Надслој	4	15	15	8	13	40	40	40	11
	Долж.	3	30,45	6,77	12,00	12,00	216,13	172,90	43,23	18,00
	Сер. бр.	2	81	82	83	84	85	86	87	88
Општи	Тун. бр.	1					8			

Општи	Геометриски							Геолошко-геотехнички											Подградба							Технологија на изградба			
	Сер. бр.	Долж.	Надслој	Наклон	Радиус	Повр.	Истр.	Вол. те.	Кохез.	Агол вт.	Етп	σ_{cm}	RMR	ROD	GSI	UCS	Раседи	Анкери	ПБ	AM	Ремен.	Чело	Цев.чад.	ФБО	Чекор	Минн.	Вода	РИЗИК	
Тун. бр.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
		105	12,00	10	21,38	0	55,23	0,005	26	80	43	500	1,8	33	38	28	0,0	0,00	3,04	62,52	620,00	1,61	20	7,10	1,00	0,0	0,2	0,005	
		106	12,00	10	21,38	0	55,23	0,006	26	80	43	500	1,8	33	28	0,0	0,00	0,00	3,04	62,52	620,00	1,61	20	7,10	1,00	0,0	0,1	0,004	
		107	75,17	35	21,38	0	54,21	0,006	26	200	45	2500	3,0	50	45	0,0	0,00	2,02	2,02	42,85	0,00	0,52	0	7,10	3,00	0,0	0,1	0,004	
		108	34,69	35	21,38	0	55,23	0,006	26	80	38	800	1,8	33	28	0,0	0,00	3,04	3,04	62,52	620,00	1,61	20	7,10	1,00	0,0	0,1	0,002	
		109	5,78	35	21,38	0	66,40	0,006	23	40	25	80	0,2	20	15	1,0	25,50	10,27	10,27	172,46	1121,0	1,84	20	8,82	1,00	0,0	0,2	0,080	
		110	12,00	14	21,38	0	55,23	0,006	26	200	45	2500	3,0	48	50	0,0	0,00	3,04	3,04	62,52	620,00	1,61	20	7,10	1,00	0,0	0,1	0,004	
		111	12,00	10	21,43	700	55,23	0,012	26	200	45	2500	3,0	48	50	0,2	0,00	3,04	3,04	62,52	620,00	1,61	20	7,10	1,00	0,0	0,1	0,010	
		112	76,60	37	21,43	700	54,21	0,012	26	200	45	2500	3,0	50	45	0,0	0,00	2,02	2,02	42,85	0,00	0,52	0	7,10	3,00	0,0	0,1	0,004	

РИЗИК	Технологија на изградба							Подградба											Општи														
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Цело	Ремен.	АМ	ПБ	Анкери	Раседи	UCS	GSI	ROD	RMR	σ_{cm}	E _{тп}	Агол вт.	Кохез.	Вол. те.	Истр.	Повр.	Радиус	Наклон	Надслој	Долж.	Сер. бр.	Тун. бр.					
29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1					
0,300	0,8	0,0	0,75	10,08	24	3,69	1200,0	256,00	12,46	40,00	1,0	25	15	40	20	0,2	80	25	40	23	0,002	81,37	500	19,05	60	3,57	129	1					
0,010	0,3	0,0	3,00	8,02	0	1,09	480,00	69,71	4,52	0,00	0,0	25	45	40	50	3,0	2500	40	300	26	0,002	70,40	500	19,05	90	45,54	130	131	132	133	134	135	136
0,009	0,4	0,0	1,00	10,08	30	2,28	1166,0	189,00	9,04	36,00	0,0	25	28	40	33	1,8	800	32	200	26	0,002	78,23	500	19,05	90	5,36	131	132	133	134	135	136	
0,250	0,6	0,0	0,75	10,08	24	3,69	1200,0	256,00	12,46	40,00	1,0	25	15	40	20	0,2	80	25	40	23	0,002	81,37	500	19,05	90	2,68	132	133	134	135	136		
0,008	0,3	0,0	1,00	8,02	0	2,22	966,00	70,00	5,67	34,00	0,0	25	45	40	50	3,0	2500	35	400	26	0,002	71,54	500	19,05	160	205,18	133	134	135	136			
0,011	0,7	0,0	0,75	10,08	24	3,69	1200,0	256,00	12,46	40,00	0,0	25	28	40	33	1,8	800	30	300	26	0,002	81,37	500	19,05	160	24,14	134	135	136				
0,200	0,8	0,0	0,75	10,08	24	3,69	1200,0	256,00	12,46	40,00	1,0	25	15	40	20	1,8	800	30	300	23	0,002	81,37	500	19,05	160	12,07	135	136					
0,008	0,3	0,0	1,00	8,02	0	2,22	966,00	70,00	5,67	34,00	0,0	25	45	40	50	3,0	2500	35	400	26	0,002	71,54	500	19,05	170	348,37	136						

РИЗИК	Технологија на изградба							Подградба							Геолошко-геотехнички							Геометриски			Општи						
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Џело	Ремен.	АМ	ПБ	Анкери	Раседи	UCS	GSI	ROD	RMR	σ_{cm}	E _{pm}	Агол вт.	Кохез.	Вол. те.	Истр.	Повр.	Радиус	Наклон	Надслој	Долж.	Сер. бр.	Тун. бр.	1	14	15
29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1			
0,013	0,012	0,003	0,003	0,090	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008
0,4	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8,02	7,10	7,10	7,10	8,82	7,10	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
30	20	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2,13	1,61	0,52	1,61	1,84	1,61	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09	2,13	2,09
600,00	620,00	0,00	620,00	1121,0	620,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00	600,00	0,00
69,34	62,52	42,85	62,52	172,46	62,52	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64	69,34	47,64
3,38	3,04	2,02	3,04	10,27	3,04	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25	3,38	2,25
0,00	0,00	0,00	0,00	25,50	0,00	0,00	0,00	25,50	0,00	0,00	0,00	25,50	0,00	0,00	0,00	25,50	0,00	0,00	0,00	25,50	0,00	0,00	0,00	25,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,2	0,0	0,0	1,0	0,1	0,0	0,0	1,0	0,1	0,0	0,0	1,0	0,1	0,0	0,0	1,0	0,1	0,0	0,0	1,0	0,1	0,0	0,0	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
28	28	45	28	15	28	28	45	28	15	28	28	45	28	15	28	28	45	28	15	28	28	45	28	28	45	28	28	45	28	28	45
36	25	25	25	25	25	42	42	25	25	42	42	25	25	42	42	25	25	42	42	25	25	42	42	25	25	42	42	25	25	42	42
33	33	50	33	20	33	33	50	20	33	33	50	20	33	33	50	20	33	33	50	20	33	33	50	20	33	33	50	20	33	33	50
1,8	1,8	3,0	1,8	0,2	1,8	1,8	3,0	0,2	1,8	1,8	3,0	0,2	1,8	1,8	3,0	0,2	1,8	1,8	3,0	0,2	1,8	1,8	3,0	0,2	1,8	1,8	3,0	0,2	1,8	1,8	3,0
500	500	2500	800	80	500	500	2500	80	500	500	2500	80	500	500	2500	80	500	500	2500	80	500	500	2500	80	500	500	2500	80	500	500	2500
43	43	45	38	25	43	43	45	25	43	38	43	25	43	38	43	25	43	38	43	25	43	38	43	25	43	38	43	25	43	38	43
80	80	200	80	40	80	80	200	40	80	80	200	40	80	80	200	40	80	80	200	40	80	80	200	40	80	80	200	40	80	80	200
26	26	26	26	23	26	26	26	23	26	26	26	23	26	26	26	23	26	26	26	23	26	26	26	23	26	26	26	26	26	26	26
0,002	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000	0,004	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000
69,25	55,23	54,21	55,23	66,40	55,23	69,25	68,12	55,23	69,25	55,23	69,25	68,12	55,23	69,25	55,23	69,25	68,12	55,23	69,25	55,23	69,25	68,12	55,23	69,25	55,23	69,25	55,23	69,25	68,12	55,23	69,25
500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19,05	19,05	24,13	24,13	24,13	24,13	20,85	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85	24,13	20,85
13	14	40	40	40	9	7	40	40	9	7	40	40	9	7	40	40	9	7	40	40	9	7	40	40	9	7	40	40	9	7	40
12,00	12,00	93,44	103,82	10,38	12,00	12,00	85,75	12,00	12,00	12,00	12,00	85,75	12,00	12,00	12,00	12,00	85,75	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	85,75	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	85,75
145	146	147	148	149	150	151	152	149	150	151	152	149	150	151	152	149	150	151	152	149	150	151	152	149	150	151	152	149	150	151	152

Општи	Тун. бр.	1	Технологија на изградба										
			РИЗИК	29	0,004	0,160	0,013	0,008	0,006	0,100	0,008	0,006	
Геометриски	Вода	28	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Минн.	27	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,4
	Чекор	26	1,00	1,00	1,00	3,00	1,50	0,75	3,00	1,50	0,75	3,00	1,50
		ФБО	25	8	9,86	8	8	8	9,86	8	9,86	8	8
	Цев.чад.	24	30	24	30	0	0	54	0	0	0	0	0
		Цело	23	2,13	2,77	2,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ремен.	22	600,00	1200,0	600,00	0,00	510,22	1629,0	0,00	510,22	1629,0	0,00	510,22
		АМ	21	69,34	250,00	69,34	95,23	96,29	166,84	95,23	96,29	95,23	96,29
	ПБ	20	3,38	12,46	3,38	3,36	5,09	9,19	3,36	5,09	9,19	3,36	5,09
		Анкери	19	0,00	18,00	0,00	30,67	41,33	42,66	30,67	41,33	42,66	41,33
	Раседи	18	0,0	1,0	0,2	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
		UCS	17	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	GSI	16	28	15	28	45	30	15	45	30	15	45	30
		ROD	15	42	42	42	35	35	35	8	8	8	8
	RMR	14	33	20	33	50	35	20	50	35	20	50	35
		σ_{cm}	13	1,8	0,2	1,8	3,0	2,0	0,2	3,0	2,0	3,0	1,8
E _{tm}	12	800	80	500	3000	1200	80	2500	800	800	2500	800	
	Агол вт.	11	38	25	43	40	38	25	45	38	25	38	
Кохез.	10	80	40	80	300	200	40	200	40	200	40	80	
	Вол. те.	9	26	23	26	26	26	23	26	23	26	26	
Истр.	8	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	
	Повр.	7	69,25	81,37	69,25	67,70	69,52	76,90	67,70	69,52	67,70	69,52	
Радиус	6	0	0	500	500	500	500	500	0	0	0	0	
	Наклон	5	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	
Надслој	4	40	40	6	70	70	70	80	80	80	80	80	
	Долж.	3	95,28	9,53	12,00	37,50	75,00	37,50	43,25	69,20	43,25	69,20	
Сер. бр.	2	153	154	155	156	157	158	159	160	159	160	160	
	Тун. бр.	1	16										

РИЗИК	Технологија на изградба							
	Вода	Минн.	Чекор	ФБО	Цев.чад.	Цело	Ремен.	АМ
29	0,100	0,300	0,120	0,007	0,005	0,100	0,400	0,200
28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3
27	0,0	0,4	0,0	0,4	0,4	0,0	0,4	0,0
26	0,75	1,50	0,75	3,00	1,50	0,75	3,00	0,75
25	9,86	8	9,86	8	8	9,86	8	9,86
24	54	0	54	0	0	54	0	54
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1629,0	510,22	1740,0	0,00	510,22	1629,0	0,00	1740,0
21	166,84	96,29	169,05	95,23	96,29	166,84	95,23	169,05
20	9,19	5,09	10,78	3,36	5,09	9,19	3,36	10,78
19	42,66	41,33	55,99	30,67	41,33	42,66	30,67	55,99
18	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0
17	25	10	25	25	25	25	10	25
16	15	18	15	45	30	15	30	15
15	8	10	10	8	8	8	3	3
14	20	25	20	50	35	20	35	20
13	0,2	0,5	0,2	3,0	1,8	0,2	0,5	0,2
12	80	550	50	2500	800	80	550	50
11	25	22	28	45	38	25	22	28
10	40	75	20	200	80	40	75	20
9	23	26	23	26	26	23	26	23
8	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
7	76,90	69,52	78,50	67,70	69,52	76,90	69,52	78,50
6	0	0	0	0	0	0	0	0
5	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85
4	80	60	60	40	40	40	35	35
3	60,55	49,20	73,80	24,25	38,80	33,95	34,00	51,00
2	161	162	163	164	165	166	167	168
1								

РИЗИК	Технологија на изградба							Подградба											Геолошко-геотехнички		Геометриски				Општи							
	Вода	Минн.	Чекор	ФБО	Цев.чад.	Цело	Ремен.	AM	ПБ	Анкери	Раседи	UCS	GSI	ROD	RMR	σ_{cm}	E _{тп}	Агол вт.	Кохез.	Вол. те.	Истр.	Повр.	Радиус	Наклон	Надслој	Долж.	Сер. бр.	Тун. бр.				
29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1				
0,240	0,7	0,0	0,75	9,86	54	0,00	1629,0	166,84	9,19	42,66	1,0	25	15	20	0,2	80	25	40	40	23	0,003	76,90	500	23,50	45	50,00	169	19				
0,010	0,3	0,4	3,00	8	0	0,00	0,00	95,23	3,36	30,67	0,0	25	45	50	3,0	3000	35	480	26	0,003	67,70	500	23,50	142	356,20	170	171	172	173	174	175	176
0,008	0,4	0,4	1,50	8	0	0,00	510,22	96,29	5,09	41,33	0,0	25	30	40	2,0	1200	30	300	26	0,003	69,52	500	23,50	142	164,40	171	172	173	174	175	176	
0,270	0,7	0,0	0,75	9,86	54	0,00	1629,0	166,84	9,19	42,66	1,0	25	15	20	0,2	80	25	40	23	0,003	76,90	500	23,50	142	27,40	172	173	174	175	176		
0,250	0,7	0,0	0,75	9,86	54	0,00	1740,0	169,05	10,78	55,99	1,0	25	15	20	0,2	50	28	20	26	0,003	78,50	500	23,50	117	100,00	173	174	175	176			
0,010	0,3	0,4	3,00	8	0	0,00	0,00	95,23	3,36	30,67	0,0	25	45	50	3,0	3000	35	480	26	0,003	67,70	500	23,50	170	65,50	174	175	176				
0,008	0,4	0,4	1,50	8	0	0,00	510,22	96,29	5,09	41,33	0,0	25	30	40	2,0	1200	30	300	26	0,003	69,52	500	23,50	170	131,00	175	176					
0,260	0,7	0,0	0,75	8	54	0,00	1740,0	169,00	11,96	42,66	1,0	25	15	20	0,2	50	28	20	23	0,003	78,50	500	23,50	170	65,50	176						

РИЗИК	Технологија на изградба							
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Цело	Ремен.	АМ
29	0,010	0,008	0,250	0,010	0,008	0,250	0,009	0,007
28	0,3	0,4	0,7	0,3	0,4	0,7	0,3	0,4
27	0,4	0,4	0,0	0,4	0,4	0,0	0,4	0,4
26	3,00	1,50	0,75	3,00	1,50	0,75	3,00	1,50
25	8	8	9,86	8	8	9,86	8	8
24	0	0	54	0	0	54	0	0
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	510,22	1740,0	0,00	510,22	1629,0	0,00	510,22
21	95,23	96,29	169,00	95,23	96,29	166,84	95,23	96,29
20	3,36	5,09	10,78	3,36	5,09	9,19	3,36	5,09
19	30,67	41,33	55,99	30,67	41,33	42,66	30,67	41,33
18	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
17	25	25	25	25	25	25	25	25
16	45	30	15	45	30	15	45	30
15	35	35	35	18	18	18	35	35
14	50	35	20	50	35	20	50	35
13	3,0	2,0	0,2	3,0	2,0	0,2	3,0	2,0
12	3000	1200	50	3000	1200	80	3000	1200
11	35	30	28	35	30	25	35	30
10	480	300	20	480	300	40	480	300
9	26	26	23	26	26	23	26	26
8	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
7	67,70	69,52	78,50	67,70	69,52	76,90	67,70	69,52
6	500	500	500	500	500	500	500	500
5	23,50	23,50	23,50	23,50	23,50	23,50	23,50	23,50
4	163	163	163	78	78	78	63	63
3	178,20	97,20	48,60	15,60	15,60	7,80	42,35	23,10
2	177	178	179	180	181	182	183	184
1								

Технологија на изградба	РИЗИК	29	0,240	0,010	0,008	0,220	0,250	0,008	0,007	0,260
	Вода	28	0,7	0,3	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,7
	Минн.	27	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0
	Чекор	26	0,75	3,00	1,50	0,75	0,75	3,00	1,50	0,75
	ФБО	25	9,86	8	8	9,86	9,86	8	8	9,86
	Цев.чад.	24	54	0	0	54	54	0	0	54
	Чело	23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ремен.	22	1629,0 ₀	0,00	510,22	1629,0 ₀	1740,0 ₀	0,00	510,22	1740,0 ₀
	AM	21	166,84	95,23	96,29	166,84	169,05	95,23	96,29	169,05
	ПБ	20	9,19	3,36	5,09	9,19	10,78	3,36	5,09	10,78
Подградба	Анкери	19	42,66	30,67	41,33	42,66	55,99	30,67	41,33	55,99
	Раседи	18	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0
	UCS	17	25	25	25	25	25	45	25	10
	GSI	16	15	45	30	15	15	45	30	15
	ROD	15	35	35	35	35	8	25	25	25
	RMR	14	20	45	30	15	15	48	33	20
	σ_{cm}	13	0,2	3,0	2,0	0,2	0,2	5,6	2,4	0,2
	E _{tm}	12	80	4200	2100	80	50	4000	1700	80
	Агол вт.	11	25	40	37	25	28	43	35	25
	Кохез.	10	40	300	250	40	20	470	280	40
Геолошко-геотехнички	Вол. те.	9	23	26	26	23	23	26	26	23
	Истр.	8	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
	Повр.	7	76,90	67,70	69,52	76,90	78,50	67,70	69,52	78,50
	Радиус	6	500	500	500	500	500	500	500	500
	Наклон	5	23,50	23,50	23,50	23,50	18,99	18,99	18,99	18,99
	Надслој	4	63	85	85	85	58	105	105	105
	Долж.	3	11,55	225,60	112,80	37,60	40,00	116,20	149,40	66,40
Општи	Сер. бр.	2	185	186	187	188	189	190	191	192
	Тун. бр.	1					20			

Општи	Тун. бр.	РИЗИК		Технологија на изградба																																										
		1	2	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1															
Геометриски	Сер. бр.	193	194	195	196	197	198	199	200	Вода	0,3	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,6	0,7												
										Минн.	0,4	0,4	0,0	0,5	0,4	0,4	0,0	0,4	0,4	0,0	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0	0,5	0,4	0,4	0,0	0,5	0,4	0,4	0,0	0,5	0,4	0,0	0,5	0,4	0,0	0,5					
										Чекор	1,50	0,75	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75			
										ФБО	8	9,86	9,86	9,86	8	9,86	9,86	8	9,86	9,86	8	9,86	9,86	8	9,86	9,86	8	9,86	9,86	8	9,86	9,86	8	9,86	9,86	8	9,86	9,86	8	9,86	9,86	8	9,86			
										Цев.чад.	0	54	54	54	0	54	54	0	54	54	0	54	54	0	54	54	0	54	54	0	54	54	0	54	54	0	54	54	0	54	54	0	54			
										Цело	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
										Ремен.	510,22	1629,0	1740,0	1740,0	510,22	1629,0	1740,0	1740,0	510,22	1629,0	1740,0	1740,0	510,22	1629,0	1740,0	1740,0	510,22	1629,0	1740,0	1740,0	510,22	1629,0	1740,0	1740,0	510,22	1629,0	1740,0	1740,0	510,22	1629,0	1740,0	1740,0	510,22	1629,0	1740,0	
										AM	96,29	166,84	169,05	169,05	96,29	166,84	169,05	169,05	96,29	166,84	169,05	169,05	96,29	166,84	169,05	169,05	96,29	166,84	169,05	169,05	96,29	166,84	169,05	169,05	96,29	166,84	169,05	169,05	96,29	166,84	169,05	169,05	96,29	166,84	169,05	
										ПБ	5,09	9,19	10,78	10,78	5,09	9,19	10,78	10,78	5,09	9,19	10,78	10,78	5,09	9,19	10,78	10,78	5,09	9,19	10,78	10,78	5,09	9,19	10,78	10,78	5,09	9,19	10,78	10,78	5,09	9,19	10,78	10,78	5,09	9,19	10,78	
										Анкери	41,33	42,66	55,99	55,99	41,33	42,66	55,99	55,99	41,33	42,66	55,99	55,99	41,33	42,66	55,99	55,99	41,33	42,66	55,99	55,99	41,33	42,66	55,99	55,99	41,33	42,66	55,99	55,99	41,33	42,66	55,99	55,99	41,33	42,66	55,99	
										Раседи	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0		
										UCS	25	25	10	10	25	25	10	10	25	25	10	10	25	25	10	10	25	25	10	10	25	25	10	10	25	25	10	10	25	25	10	10	25	25		
										GSI	45	30	15	15	45	30	15	15	45	30	15	15	45	30	15	15	45	30	15	15	45	30	15	15	45	30	15	15	45	30	15	15	45	30		
										ROD	11	11	11	8	30	30	30	8	30	30	30	8	30	30	30	30	8	30	30	30	8	30	30	30	8	30	30	30	8	30	30	30	8	30		
										RMR	48	33	20	20	45	30	20	20	45	30	20	20	45	30	20	20	45	30	20	20	45	30	20	20	45	30	20	20	45	30	20	20	45	30		
										σ_{cm}	3,0	2,4	0,2	0,2	3,0	2,4	0,2	0,2	3,0	2,4	0,2	0,2	3,0	2,4	0,2	0,2	3,0	2,4	0,2	0,2	3,0	2,4	0,2	0,2	3,0	2,4	0,2	0,2	3,0	2,4	0,2	0,2	3,0	2,4		
										E _{тп}	3300	1700	80	50	3300	1700	80	50	3300	1700	80	50	3300	1700	80	50	3300	1700	80	50	3300	1700	80	50	3300	1700	80	50	3300	1700	80	50	3300	1700	80	50
										Агол вт.	42	39	25	28	42	39	25	28	42	39	25	28	42	39	25	28	42	39	25	28	42	39	25	28	42	39	25	28	42	39	25	28	42	39	25	
										Кохез.	270	200	40	20	270	200	40	20	270	200	40	20	270	200	40	20	270	200	40	20	270	200	40	20	270	200	40	20	270	200	40	20	270	200	40	20
										Вол. те.	26	26	23	23	26	26	23	23	26	26	23	23	26	26	23	23	26	26	23	23	26	26	23	23	26	26	23	23	26	26	23	23	26	26	23	
Истр.	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003												
Повр.	67,70	69,52	76,90	78,50	67,70	69,52	76,90	78,50	67,70	69,52	76,90	78,50	67,70	69,52	76,90	78,50	67,70	69,52	76,90	78,50	67,70	69,52	76,90	78,50	67,70	69,52	76,90	78,50	67,70	69,52	76,90	78,50	67,70	69,52	76,90											
Радиус	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500											
Наклон	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99											
Надслој	50	50	50	39	54	54	54	39	54	54	54	39	54	54	54	39	54	54	54	39	54	54	54	39	54	54	54	39	54	54	54	39	54	54												
Долж.	30,60	45,90	25,50	44,00	6,60	18,15	8,25	55,00	30,60	45,90	25,50	44,00	6,60	18,15	8,25	55,00	30,60	45,90	25,50	44,00	6,60	18,15	8,25	55,00	30,60	45,90	25,50	44,00	6,60	18,15	8,25	55,00	30,60	45,90	25,50											
Сер. бр.	193	194	195	196	197	198	199	200	193	194	195	196	197	198	199	200	193	194	195	196	197	198	199	200	193	194	195	196	197	198	199	200	193	194	195											
Тун. бр.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34												

РИЗИК	Технологија на изградба								
	Вода	Минн.	Чекор	ФБО	Цев.чад.	Цело	Ремен.	АМ	
29	0,011	0,009	0,220	0,100	0,008	0,220	0,011	0,008	
28	0,3	0,4	0,6	0,3	0,4	0,6	0,2	0,1	
27	0,4	0,4	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,4	
26	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	3,00	
25	8	9,86	9,86	8	9,86	9,86	6,78	6,78	
24	0	54	54	0	54	54	29	0	
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
22	510,22	1629,0	1740,0	510,22	1629,0	1740,0	217,60	0,00	
21	96,29	166,84	169,05	96,29	166,84	169,05	43,23	42,89	
20	5,09	9,19	10,78	5,09	9,19	10,78	4,05	3,01	
19	41,33	42,66	55,99	41,33	42,66	55,99	0,00	25,33	
18	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,1	0,0	
17	25	25	25	25	25	25	25	25	
16	45	30	15	50	35	15	30	40	
15	30	30	30	35	35	35	13	13	
14	45	30	15	45	30	15	35	45	
13	3,0	2,4	0,2	3,0	2,4	0,2	2,0	3,0	
12	3300	1700	80	4200	2100	80	1300	3200	
11	42	39	25	48	45	25	44	49	
10	270	200	40	180	130	40	80	140	
9	26	26	23	26	26	23	26	26	
8	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,008	0,008	
7	67,70	69,52	76,90	67,70	69,52	76,90	54,47	53,45	
6	0	0	0	500	500	500	500	500	
5	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	18,99	8,50	
4	67	67	67	26	26	26	20	20	
3	43,80	120,45	54,75	25,20	25,20	12,60	12,00	11,30	
2	201	202	203	204	205	206	207	208	
Тун. бр.	1	21							

РИЗИК	Технологија на изградба							
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Чело	Ремен.	АМ
29	0,230	0,011	0,100	0,230	0,012	0,011	0,230	0,013
28	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,2
27	0,0	0,4	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	0,4
26	0,75	3,00	1,50	0,75	3,00	1,50	0,75	3,00
25	9,69	7,87	7,87	9,69	7,87	7,87	9,69	7,87
24	54	0	0	54	0	0	54	0
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1659,6	0,00	522,33	1659,6	0,00	522,33	1659,6	0,00
21	83,42	47,62	48,15	83,42	47,62	48,15	83,42	47,62
20	9,44	3,36	5,09	9,44	3,36	5,09	9,44	3,36
19	42,66	30,67	41,33	42,66	30,67	41,33	42,66	30,67
18	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0
17	50	30	30	30	50	50	50	50
16	15	45	30	15	45	30	15	45
15	65	44	44	44	24	24	24	83
14	20	48	33	20	48	33	20	48
13	0,2	4,8	3,8	0,2	11,0	8,8	0,2	11,0
12	50	1900	960	50	4000	2000	50	4000
11	28	43	39	28	51	49	28	49
10	20	470	380	20	690	560	20	900
9	21	24	24	21	21	21	21	22
8	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
7	76,90	67,70	69,52	76,90	67,70	69,52	76,90	67,70
6	0	0	0	0	0	0	0	0
5	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
4	100	130	130	130	150	150	150	215
3	18,10	44,80	89,60	89,60	229,20	95,50	57,30	164,50
2	217	218	219	220	221	222	223	224
1								

РИЗИК	Технологија на изградба							
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Цело	Ремен.	АМ
29	0,012	0,250	0,014	0,013	0,250	0,010	0,009	0,250
28	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5
27	0,4	0,0	0,4	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0
26	1,50	0,75	3,00	1,50	0,75	3,00	1,50	0,75
25	7,87	9,69	7,87	7,87	9,69	7,87	7,87	9,69
24	0	54	0	0	54	0	0	54
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	522,33	1659,6	0,00	522,33	1659,6	0,00	522,33	1659,6
21	48,15	83,42	47,62	48,15	83,42	47,62	48,15	83,42
20	5,09	9,44	3,36	5,09	9,44	3,36	5,09	9,44
19	41,33	42,66	30,67	41,33	42,66	30,67	41,33	42,66
18	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0
17	50	50	30	30	30	50	50	50
16	30	15	48	33	15	48	33	15
15	83	83	43	43	43	60	60	60
14	33	20	48	33	20	48	33	20
13	8,8	0,2	4,8	3,8	0,2	11,0	8,8	0,2
12	2000	50	1900	960	50	4000	2000	50
11	46	28	40	36	28	49	46	28
10	740	20	620	510	20	850	710	20
9	22	21	24	24	21	22	22	21
8	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
7	69,52	76,90	67,70	69,52	76,90	67,70	69,52	76,90
6	0	0	0	0	0	0	0	0
5	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
4	215	215	200	200	200	200	200	200
3	47,00	23,50	10,85	10,85	9,30	304,50	182,70	121,80
2	225	226	227	228	229	230	231	232
1								

РИЗИК	Технологија на изградба							
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Цело	Ремен.	АМ
29	0,009	0,001	0,200	0,007	0,006	0,200	0,009	0,008
28	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3
27	0,4	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	0,4	0,0
26	3,00	1,50	0,75	3,00	1,50	0,75	3,00	1,50
25	7,87	7,87	9,69	7,87	7,87	9,69	7,87	7,87
24	0	0	54	0	0	54	0	0
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	522,33	1659,6	0,00	522,33	1659,6	0,00	522,33
21	47,62	48,15	83,42	47,62	48,15	83,42	47,62	48,15
20	3,36	5,09	9,44	3,36	5,09	9,44	3,36	5,09
19	30,67	41,33	42,66	30,67	41,33	42,66	30,67	41,33
18	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
17	30	30	30	30	30	30	30	30
16	48	33	15	48	33	15	48	33
15	35	35	35	60	60	60	35	35
14	48	33	20	48	33	20	48	33
13	4,8	3,8	0,2	11,0	8,8	0,2	4,8	3,8
12	1900	960	50	4000	2000	50	1900	960
11	52	49	28	59	57	28	52	49
10	230	180	20	340	270	20	230	180
9	24	24	21	22	22	21	24	24
8	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
7	67,70	69,52	76,90	67,70	69,52	76,90	67,70	69,52
6	0	0	0	0	0	0	0	0
5	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
4	38	38	38	42	42	42	42	42
3	9,45	9,45	8,10	70,50	42,30	28,20	8,75	8,75
2	233	234	235	236	237	238	239	240
1								

РИЗИК	Технологија на изградба							
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Џело	Ремен.	АМ
29	0,200	0,007	0,006	0,200	0,009	0,008	0,200	0,007
28	0,5	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	0,2
27	0,0	0,4	0,4	0,0	0,4	0,4	0,0	0,4
26	0,75	3,00	1,50	0,75	3,00	1,50	0,75	3,00
25	9,69	7,87	7,87	9,69	7,87	7,87	9,69	7,87
24	54	0	0	54	0	0	54	0
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1659,6	0,00	522,33	1659,6	0,00	522,33	1659,6	0,00
21	83,42	47,62	48,15	83,42	47,62	48,15	83,42	47,62
20	9,44	3,36	5,09	9,44	3,36	5,09	9,44	3,36
19	42,66	30,67	41,33	42,66	30,67	41,33	42,66	30,67
18	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0
17	30	50	50	30	30	30	30	50
16	15	48	33	15	48	33	15	48
15	35	60	60	35	35	35	35	60
14	20	48	33	20	48	33	20	48
13	0,2	11,0	8,8	0,2	4,8	3,8	0,2	11,0
12	50	4000	2000	50	1900	960	50	4000
11	28	59	57	28	52	49	28	60
10	20	340	270	20	230	180	20	310
9	21	22	22	21	24	24	21	22
8	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
7	76,90	67,70	69,52	76,90	67,70	69,52	76,90	67,70
6	0	0	0	0	0	0	0	0
5	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
4	42	42	42	42	38	38	38	35
3	7,50	16,80	8,40	2,80	5,60	5,60	4,80	152,40
2	241	242	243	244	245	246	247	248
1								

РИЗИК	Технологија на изградба																													
	Вода	Минн.	Чекор	ФБО	Цев,чад.	Цело	Ремен.	АМ	ПБ	Анкери	Раседи	UCS	GSI	ROD	RMR	σ_{cm}	Егп	Агол вт.	Кохез.	Вол. те.	Истр.	Повр.	Радиус	Наклон	Надслој	Долж.	Сер. бр.	Тун. бр.		
29	0,006	0,200	0,005	0,001	0,008	0,003	0,002	0,002	0,002	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
28	0,3	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
27	0,4	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
26	1,50	0,75	0,75	5,00	4,00	4,00	1,00	0,75	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
25	7,87	9,69	22,68	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	54	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0,00	0,00	6,59	0,57	0,73	0,73	2,45	2,45	2,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	522,33	1659,6	671,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	48,15	83,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	5,09	9,44	5,69	2,09	3,15	3,15	6,10	6,10	6,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	41,33	42,66	0,00	9,00	14,00	14,00	74,00	74,00	74,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,0	1,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	50	50	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	33	15	10	55	30	30	15	5	5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	60	60	70	70	70	70	40	40	40	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	33	20	10	71	51	44	31	10	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	8,8	0,2	2,2	8,0	5,0	5,0	3,0	2,2	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	2000	50	770	10335	3070	3070	960	770	770	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	58	28	47	53	48	48	40	47	47	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	240	20	55	500	280	280	150	55	55	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	22	21	22	25	25	25	25	22	22	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
8	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
7	69,52	76,90	77,72	57,46	58,52	58,52	67,04	77,72	77,72	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0	0	700	700	700	700	0	0	0	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
5	8,50	8,50	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
4	35	35	24	54	54	48	48	24	24	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
3	76,20	25,40	20,00	20,00	180,00	224,00	56,00	20,00	20,00	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
2	249	250	251	252	253	254	255	251	251	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
1																														

РИЗИК	0,008				0,007				0,005				0,005				0,003				0,002				0,003				0,002			
	Вода	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1			
Минн.	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1			
Чекор	0,75	4,00	1,00	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75			
ФБО	22,68	10,08	14,25	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	14,25	14,25	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68		
Цев.чад.	15	0	0	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	0	0	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15			
Чело	6,59	0,73	2,45	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	2,45	2,45	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59			
Ремен.	671,00	0,00	455,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	455,00	455,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00			
AM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
ПБ	5,69	3,15	6,10	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	6,10	6,10	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69			
Анкери	0,00	14,00	74,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74,00	74,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Раседи	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1			
UCS	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5			
GSI	5	30	15	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	30	30	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5			
ROD	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	45	45	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30			
RMR	10	52	28	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	45	45	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10			
σ_{cm}	2,2	5,0	3,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	5,0	5,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	1,3			
E _{тп}	770	3070	960	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	3070	3070	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770			
Агол вт.	40	51	43	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	52	52	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	36			
Кохез.	90	240	130	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	230	230	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	50			
Вол. те.	22	26	26	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	26	26	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22			
Истр.	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,009			
Повр.	77,72	58,52	67,04	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	67,04	67,04	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72	77,72			
Радиус	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	0	0	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	500		
Наклон	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	23,70	23,70	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	23,50			
Надслој	25	40	34	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	35	35	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	18			
Долж.	20,00	75,00	15,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	130,00	130,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00			
Сер. бр.	257	258	259	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	261	262	261	261	261	261	261	261	261	261	261	261	261	261	261			
Тун. бр.	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4			

Општи	Тун. бр.		1		5		271		272	
	1	2	265	266	267	268	269	270	271	272
РИЗИК	29	0,003	0,005	0,002	0,001	0,080	0,002	0,001	0,001	
	Вода	28	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0
Технологија на изградба	Минн.	27	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
	Чекор	26	1,00	4,00	0,75	0,75	0,75	5,00	4,00	0,75
Подградба	ФБО	25	14,25	10,08	22,68	22,68	19,25	10,08	10,08	22,68
	Цев.чад.	24	0	0	15	15	15	0	0	15
Геолошко-геотехнички	Чело	23	2,45	0,73	6,59	6,59	6,20	0,57	0,73	6,59
	Ремен.	22	455,00	0,00	671,00	671,00	655,00	0,00	0,00	671,00
Геометриски	AM	21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ПБ	20	6,10	3,15	5,69	5,69	7,19	2,09	3,15	5,69
Општи	Анкери	19	74,00	14,00	0,00	0,00	24,00	9,00	14,00	0,00
	Раседи	18	0,0	0,1	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
Геолошко-геотехнички	UCS	17	30	30	30	49	49	49	49	49
	GSI	16	15	30	5	5	5	30	30	5
Геолошко-геотехнички	ROD	15	8	45	45	5	5	85	85	5
	RMR	14	31	45	10	10	10	57	57	10
Геолошко-геотехнички	σ_{cm}	13	1,7	3,2	1,3	2,4	2,4	5,9	5,9	2,4
	E _{тп}	12	620	2000	500	1270	1270	5050	5050	1270
Геолошко-геотехнички	Агол вт.	11	41	49	36	40	40	51	51	40
	Кохез.	10	68	150	50	80	80	250	250	80
Геолошко-геотехнички	Вол. те.	9	26	26	22	22	22	26	26	22
	Истр.	8	0,009	0,009	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Геометриски	Повр.	7	67,04	58,52	77,72	77,72	73,75	57,46	58,52	77,72
	Радиус	6	500	500	500	0	0	0	0	0
Геометриски	Наклон	5	23,50	23,50	23,50	23,60	23,60	23,60	23,60	23,60
	Надслој	4	20	20	18	21,5	26	33	33	18,5
Општи	Долж.	3	80,00	40,00	20,00	20,00	20,00	21,00	84,00	20,00
	Сер. бр.	2	265	266	267	268	269	270	271	272

РИЗИК	Технологија на изградба								
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Џело	Ремен.	АМ	
29	0,005	0,002	0,004	0,500	0,006	0,450	0,005	0,450	
28	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,5	
27	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	
26	0,75	1,00	4,00	0,75	4,00	0,75	1,00	0,75	
25	23,95	16,01	13,02	17,03	13,02	20,25	16,01	20,25	
24	15	0	0	0	0	0	0	0	
23	6,9	2,71	0,87	6,16	0,87	7,38	2,71	7,38	
22	705,00	483,00	0,00	676,00	0,00	1096,0 ⁷	483,00	1096,0 ⁷	
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
20	6,02	6,39	3,42	7,64	3,42	12,01	6,39	12,01	
19	0,00	78,00	16,00	81,00	16,00	222,00	78,00	222,00	
18	0,2	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	
17	48	48	48	48	48	48	48	48	
16	5	15	30	5	30	5	30	5	
15	8	8	18	18	18	18	23	23	
14	10	33	42	10	45	10	45	10	
13	2,0	3,7	6,7	2,0	6,7	2,0	6,7	2,0	
12	800	1230	3900	800	3900	800	3900	800	
11	40	45	42	27	38	24	38	24	
10	60	130	625	200	850	270	900	280	
9	20	25	25	20	25	20	25	20	
8	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	
7	87,34	77,18	69,83	79,52	69,83	86,69	77,18	86,69	
6	500	500	0	0	0	0	0	0	
5	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	
4	20	34,5	170	180	279	286	305	305	
3	20,00	75,00	570,00	20,00	250,00	20,00	220,00	20,00	
2	273	274	275	276	277	278	279	280	
Тун. бр.	1	6							
Општи									

Општи	РИЗИК		0,005		0,002		0,005		0,005		0,002		0,005		0,200		0,400	
	Вода	28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2		
Технологија на изградба	Минн.	27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3			
	Чекор	26	1,00	5,00	4,00	1,00	5,00	1,00	5,00	1,00	4,00	0,75						
Подградба	ФБО	25	16,01	13,02	13,02	16,01	13,02	16,01	13,02	16,01	13,02	20,25						
	Цев.чад.	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
	Чело	23	2,71	0,69	0,87	2,71	0,69	2,71	0,69	2,71	0,87	7,38						
	Ремен.	22	483,00	0,00	0,00	483,00	0,00	483,00	0,00	483,00	0,00	1096,0 ⁷						
	АМ	21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							
	ПБ	20	6,39	2,27	3,42	6,39	2,27	6,39	3,42	6,39	3,42	12,01						
	Анкери	19	78,00	9,00	16,00	78,00	9,00	78,00	16,00	78,00	16,00	222,00						
	Раседи	18	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0						
	UCS	17	48	64	64	48	64	48	64	48	48							
	GSI	16	30	50	30	30	50	30	30	30	5							
Геолошко-геотехнички	ROD	15	23	23	23	23	23	23	23	23	23							
	RMR	14	45	70	46	46	70	46	46	46	10							
	σ_{cm}	13	6,7	13,6	8,9	6,7	13,6	6,7	6,7	6,7	2,0							
	E _{tm}	12	3900	13200	3900	3900	13200	3900	3900	3900	800							
	Агол вт.	11	38	44	38	36	44	36	36	36	23							
	Кохез.	10	900	1600	1130	1000	1600	1000	1000	1000	320							
	Вол. те.	9	25	25	25	25	25	25	25	25	20							
	Истр.	8	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001							
	Повр.	7	77,18	68,67	69,83	77,18	68,67	77,18	69,83	77,18	86,69							
	Радиус	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
Геометриски	Наклон	5	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40							
	Надслотј	4	300	358	375	375	372	375	375	375	373							
	Долж.	3	70,00	155,00	555,00	105,00	113,00	322,00	50,00	20,00								
Општи	Сер. бр.	2	281	282	283	284	285	286	287	288								
	Тун. бр.	1																

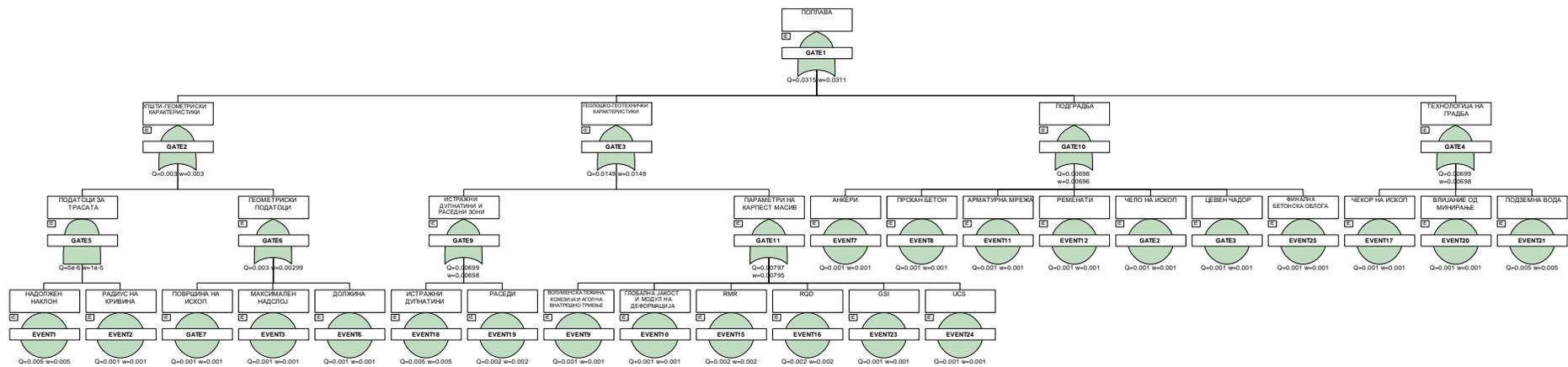
РИЗИК	Технологија на изградба							
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Цело	Ремен.	АМ
29	0,200	0,005	0,002	0,500	0,004	0,450	0,002	0,005
28	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	0,1
27	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0	0,1
26	4,00	1,00	5,00	0,75	5,00	0,75	5,00	1,00
25	13,02	16,01	13,02	17,03	13,02	20,25	13,02	16,01
24	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0,87	2,71	0,69	6,16	0,69	7,38	0,69	2,71
22	0,00	483,00	0,00	676,00	0,00	1096,0 ⁷	0,00	483,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	3,42	6,39	2,27	7,64	2,27	12,01	2,27	6,39
19	16,00	78,00	9,00	81,00	9,00	222,00	9,00	78,00
18	0,0	0,0	0,2	1,0	0,2	1,0	0,0	0,2
17	48	48	64	48	64	48	64	48
16	30	30	50	5	50	5	50	15
15	23	23	63	15	63	15	63	15
14	46	46	70	10	70	10	70	36
13	6,7	6,7	13,6	2,0	13,6	2,0	13,6	6,7
12	3900	3900	13200	800	13200	800	13200	3900
11	36	36	46	24	46	24	46	38
10	1000	1000	1450	270	1450	270	1450	900
9	25	25	25	20	25	20	25	25
8	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
7	69,83	77,18	68,67	79,52	68,67	86,69	68,67	77,18
6	0	0	0	0	0	0	0	0
5	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40
4	370	342	306	274	285	290	305	309
3	310,00	490,00	110,00	20,00	120,00	20,00	52,00	28,00
2	289	290	291	292	293	294	295	296
1								

РИЗИК	Технологија на изградба							Општи
	Вода	Минн.	Чеќор	ФБО	Цев.чад.	Џело	Ремен.	
29	0,001	0,002	0,002	0,110	0,002	0,008	0,100	0,004
28	0,2	0,1	0,0	0,3	0,2	0,2	0,2	0,0
27	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0
26	0,75	0,75	1,00	0,75	0,75	0,75	0,75	4,00
25	23,95	22,68	14,25	19,25	22,68	22,68	19,25	10,08
24	15	15	0	15	15	15	15	0
23	6,9	6,59	2,45	6,2	6,59	6,59	6,2	0,75
22	705,00	671,00	455,00	655,00	671,00	671,00	655,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	6,02	5,69	6,10	7,19	5,69	5,69	7,19	3,15
19	0,00	0,00	74,00	24,00	0,00	0,00	24,00	14,00
18	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,3	0,7	0,0
17	80	32	32	32	32	48	48	48
16	5	10	30	10	10	5	5	15
15	25	15	15	15	15	13	13	45
14	10	10	38	10	10	10	10	31
13	4,7	1,0	2,6	1,0	1,0	2,8	2,8	3,7
12	800	244	970	244	244	440	440	1230
11	50	31	38	31	31	44	42	42
10	70	43	220	43	43	75	100	180
9	20	22	24,5	22	22	20	20	25
8	0,001	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
7	87,34	77,72	67,04	73,75	77,72	77,72	73,75	58,52
6	0	0	1000	1000	1000	500	500	500
5	5,00	16,52	16,52	16,52	16,52	3,00	3,00	3,00
4	24	24	55	24	20,5	24	45	58
3	20,00	20,00	360,00	20,00	20,00	20,00	45,00	27,00
2	305	306	307	308	309	310	311	312
1			7				9	

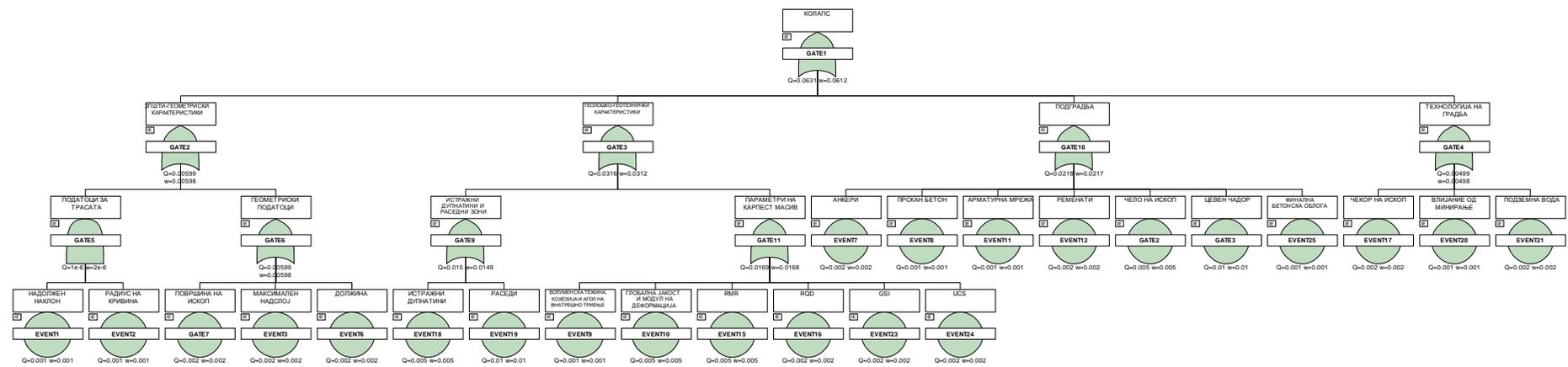
РИЗИК	0,002		0,100		0,008		0,002		0,003		0,002		0,002		0,005	
	Вода	0,0	0,4	0,4	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Минн.	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Чекор	1,00	0,75	0,75	0,75	0,75	1,00	0,75	0,75	1,00	0,75	0,75	1,00	0,75	0,75	1,00	1,00
ФБО	14,25	19,25	22,68	22,68	14,25	14,25	22,68	23,95	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50
Цев.чад.	0	15	15	15	15	0	15	15	0	15	15	0	15	15	0	0
Цело	2,45	6,2	6,59	6,59	2,45	2,45	6,59	6,9	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82
Ремен.	455,00	655,00	671,00	671,00	455,00	455,00	671,00	705,00	489,00	489,00	489,00	489,00	489,00	489,00	489,00	489,00
AM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ПБ	6,10	7,19	5,69	5,69	6,10	6,10	5,69	6,02	6,52	6,52	6,52	6,52	6,52	6,52	6,52	6,52
Анкери	74,00	24,00	0,00	0,00	74,00	74,00	0,00	0,00	78,00	78,00	78,00	78,00	78,00	78,00	78,00	78,00
Раседи	0,0	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
UCS	48	48	48	16	16	16	16	30	30	30	30	30	30	30	30	30
GSI	15	5	5	10	15	15	10	5	15	15	15	5	15	15	15	15
ROD	45	3	3	15	15	15	15	43	43	43	43	43	43	43	43	43
RMR	31	10	10	10	25	10	10	10	30	30	30	30	30	30	30	30
σ_{cm}	3,7	2,8	2,8	0,8	1,2	0,8	2,3	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
E _{tm}	1230	440	440	120	410	120	230	280	280	280	280	280	280	280	280	280
Агол вт.	46	44	44	35	36	35	47	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Кохез.	120	75	75	42	100	42	60	140	140	140	140	140	140	140	140	140
Вол. те.	25	20	20	22	25	22	20	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Истр.	0,003	0,003	0,003	0,007	0,007	0,007	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Повр.	67,04	73,75	77,72	77,72	67,04	67,04	77,72	87,34	79,97	79,97	79,97	79,97	79,97	79,97	79,97	79,97
Радиус	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Наклон	3,00	3,00	8,20	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Надслој	30	29	21	22	45	23	23	43	43	43	43	43	43	43	43	43
Долж.	80,00	30,00	20,00	20,00	300,00	20,00	20,00	115,00	115,00	115,00	115,00	115,00	115,00	115,00	115,00	115,00
Сер. бр.	321	322	323	324	325	326	327	328	328	328	328	328	328	328	328	328
Тун. бр.	1				10											
Општи																

РИЗИК	Технологија на изградба					
	Вода	Минн.	Чекор	ФБО	Цев.чад.	Цело
29	0,110	0,008	0,100	0,002	0,001	
28	0,3	0,0	0,5	0,0	0,2	
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
26	0,75	1,00	0,75	4,00	0,75	
25	19,14	18,50	19,14	13,02	23,95	
24	0	0	0	0	15	
23	6,38	2,82	6,38	0,87	6,9	
22	685,00	489,00	685,00	0,00	705,00	
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
20	7,76	6,52	7,76	3,42	6,02	
19	81,00	78,00	81,00	16,00	0,00	
18	1,0	0,2	1,0	0,0	0,2	
17	30	30	30	80	80	
16	5	15	5	35	5	
15	43	43	43	43	43	
14	10	30	10	50	10	
13	2,3	3,0	2,3	9,7	4,0	
12	230	280	230	8200	2050	
11	41	36	37	48	43	
10	120	350	170	540	90	
9	20	25	20	25	20	
8	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	
7	81,87	79,97	81,87	69,83	87,34	
6	0	0	550	550	0	
5	13,80	13,80	5,80	5,80	5,80	
4	62	158	102	94	34	
3	20,00	660,00	20,00	110,00	20,00	
2	337	338	339	340	341	
1						

10.2 Дрва на грешки и дрва на настани за различни хазарди и ризици

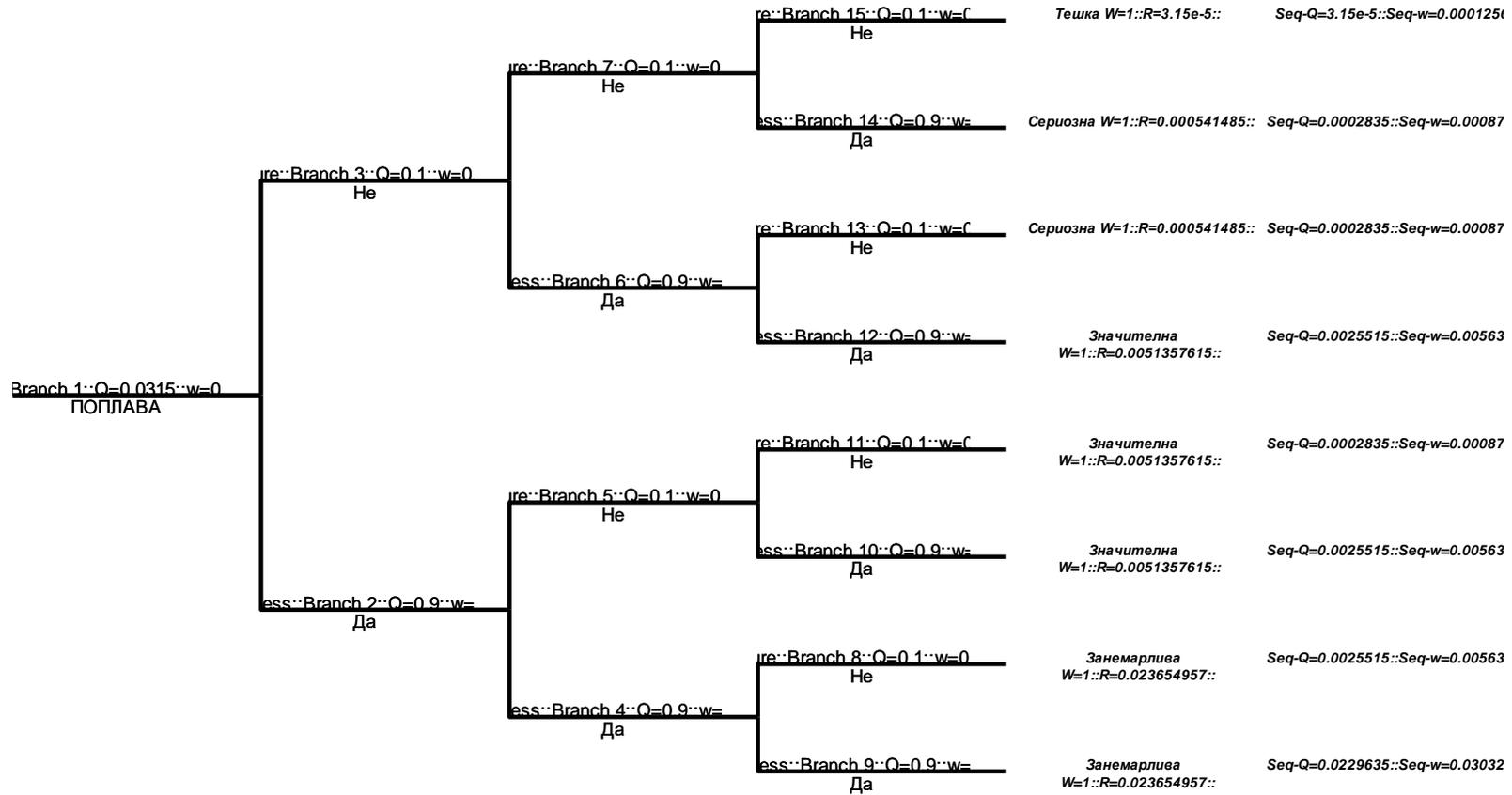


Дрво на грешки за појлава за тунел 3 и 4 од делница I



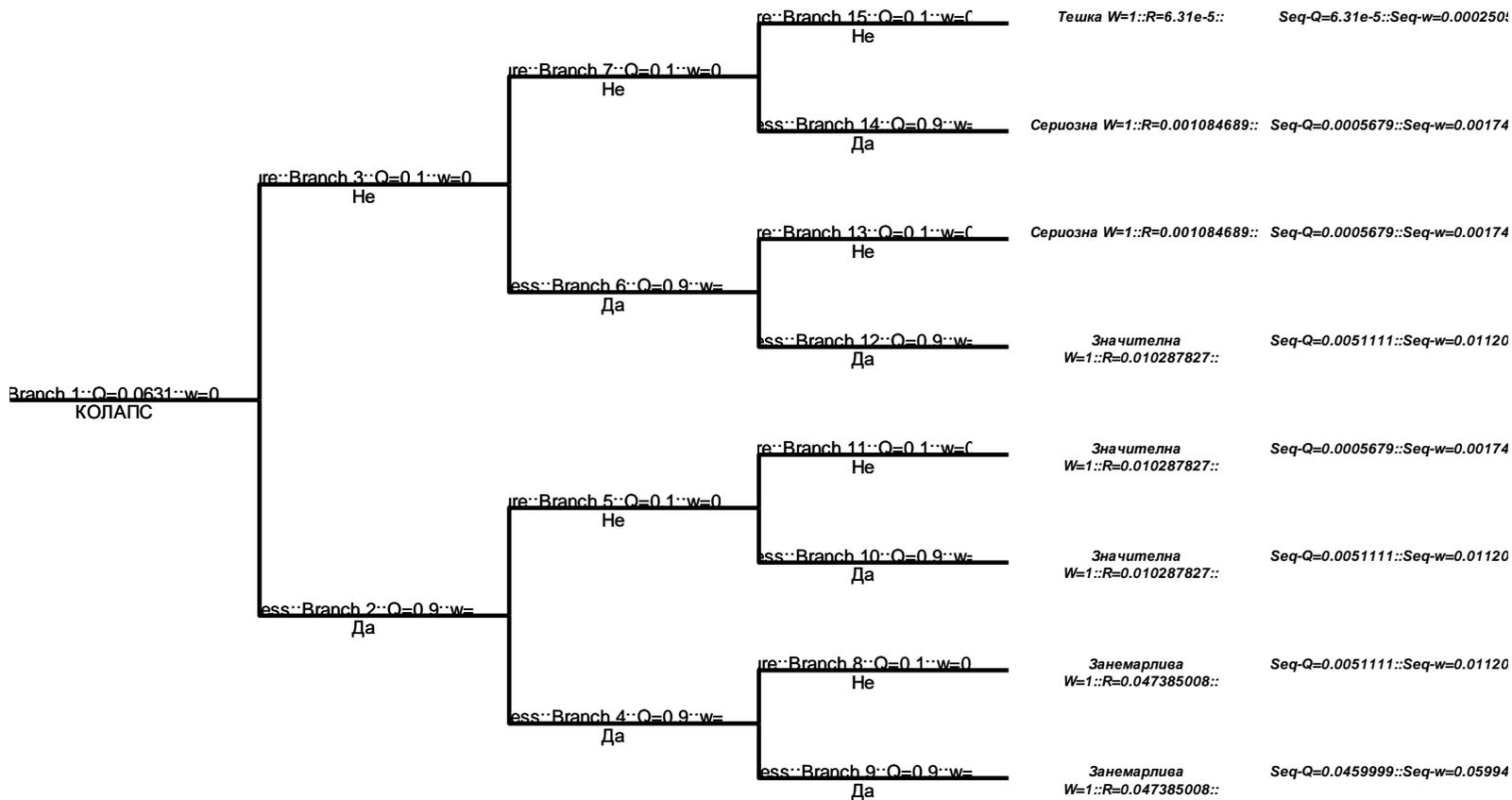
Дрво на грешки за колапс за тунел 3 и 4 од делница I

Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Дренаирање	Consequence	Result
Иницијален (врвен) настан					

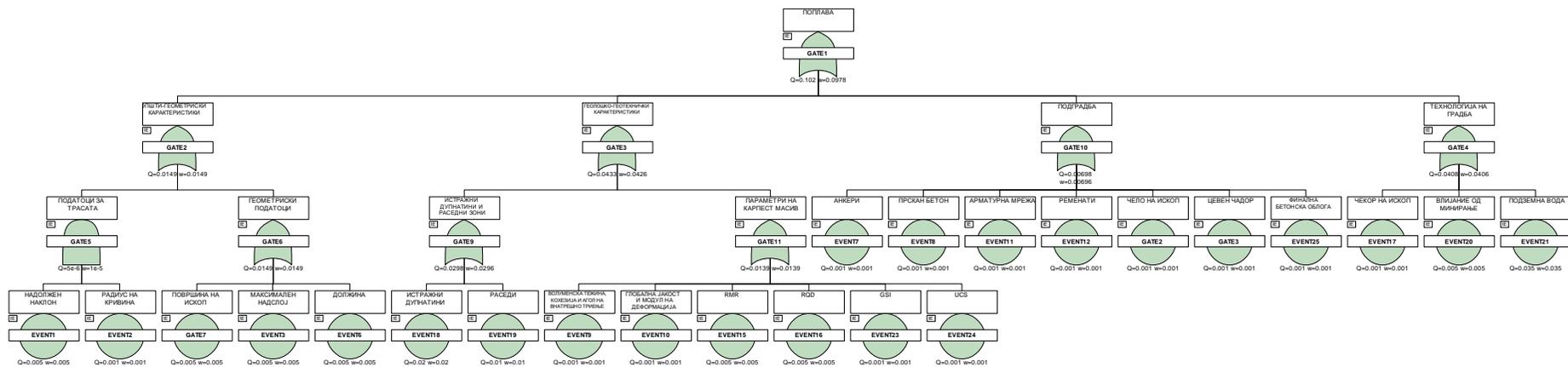


Дрво на настјани за поплава за тунел 3 и 4 од делница I

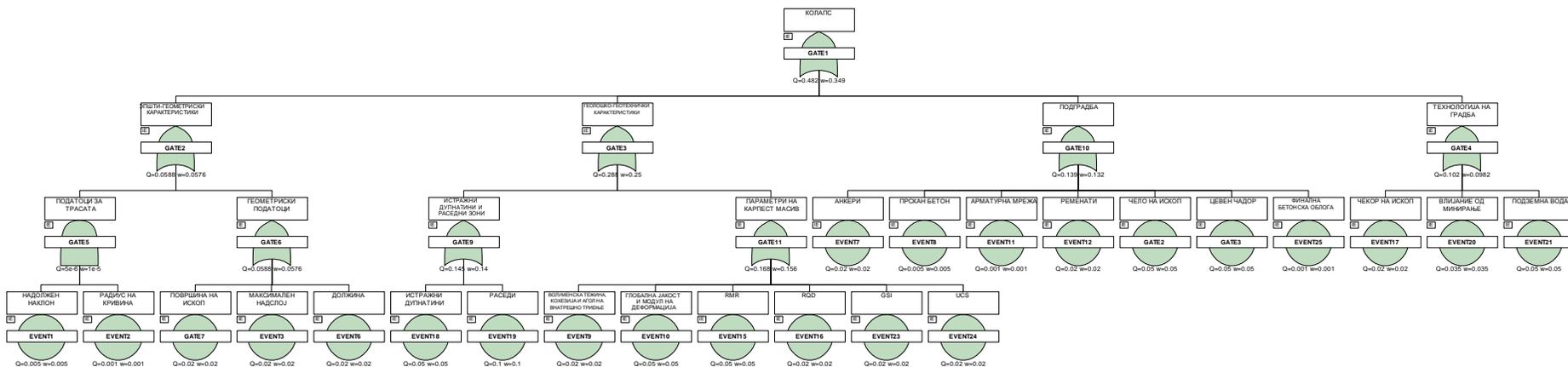
Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Модификација на ископ	Consequence	Result
Иницијален (врвен) настан					



Дрво на настани за колапс за тунел 3 и 4 од делница I

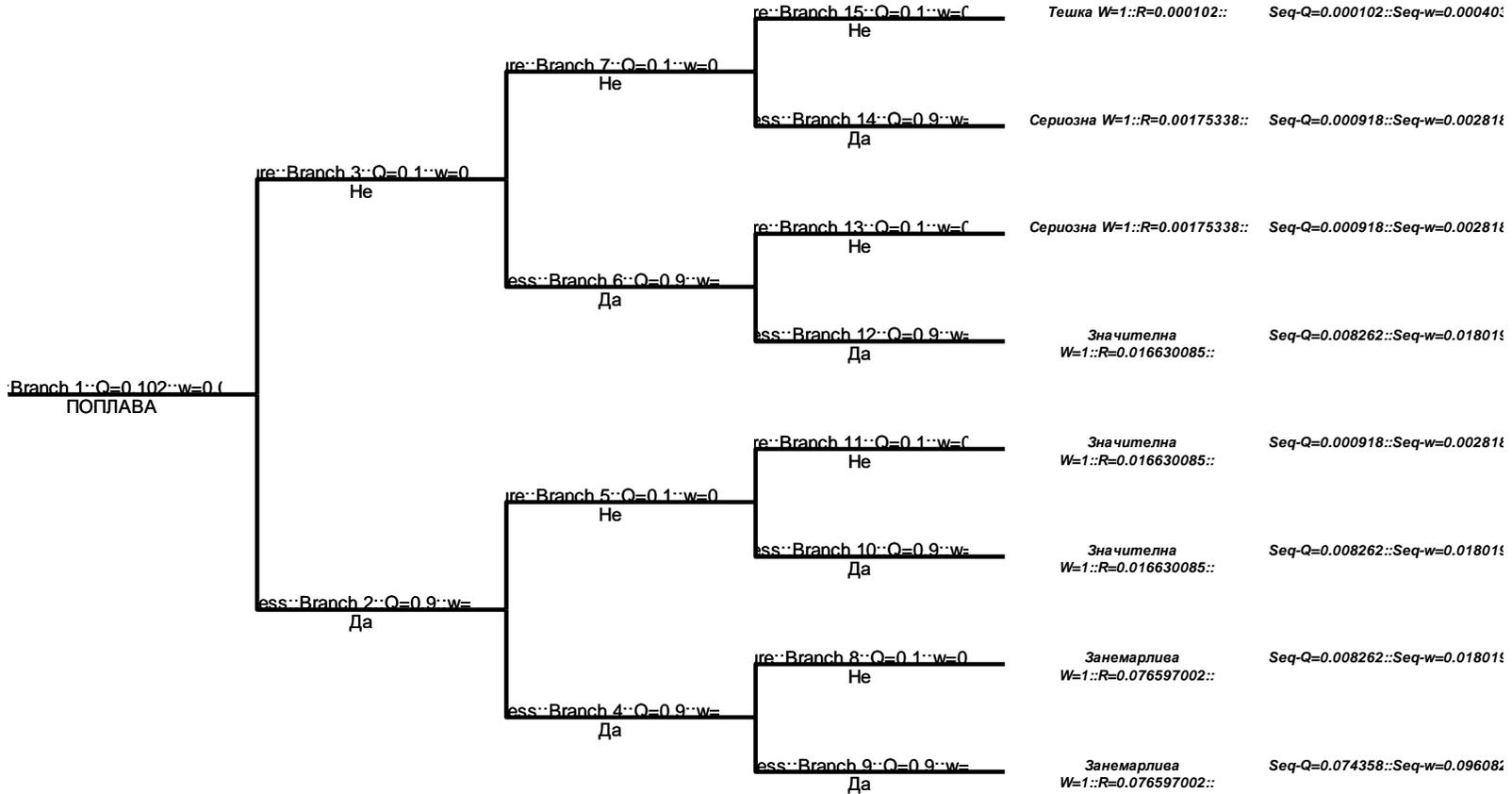


Дрво на грешки за поилава за тунел 15 од делница I



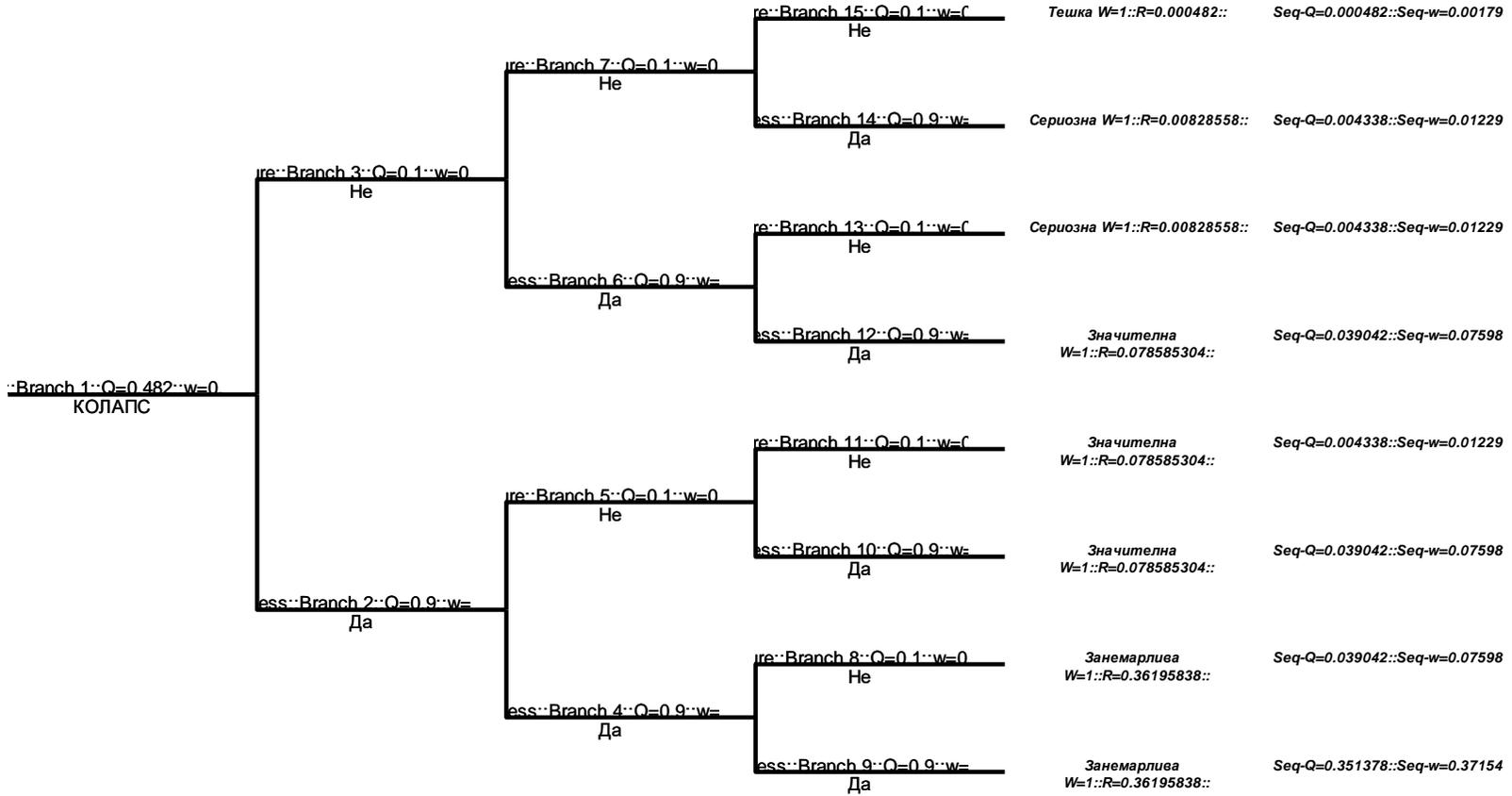
Дрво на грешки за колаџС за тунел 15 од делница I

Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Дренаирање	Consequence	Result
--------	-------------	-------------------	------------	-------------	--------

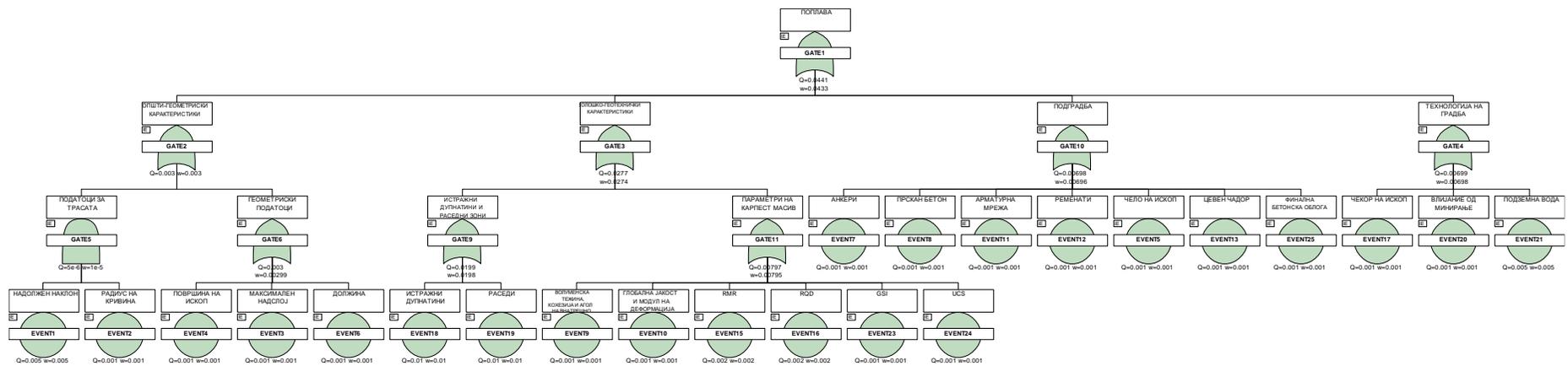


Дрво на настјани за поплава за тунел 15 од делница I

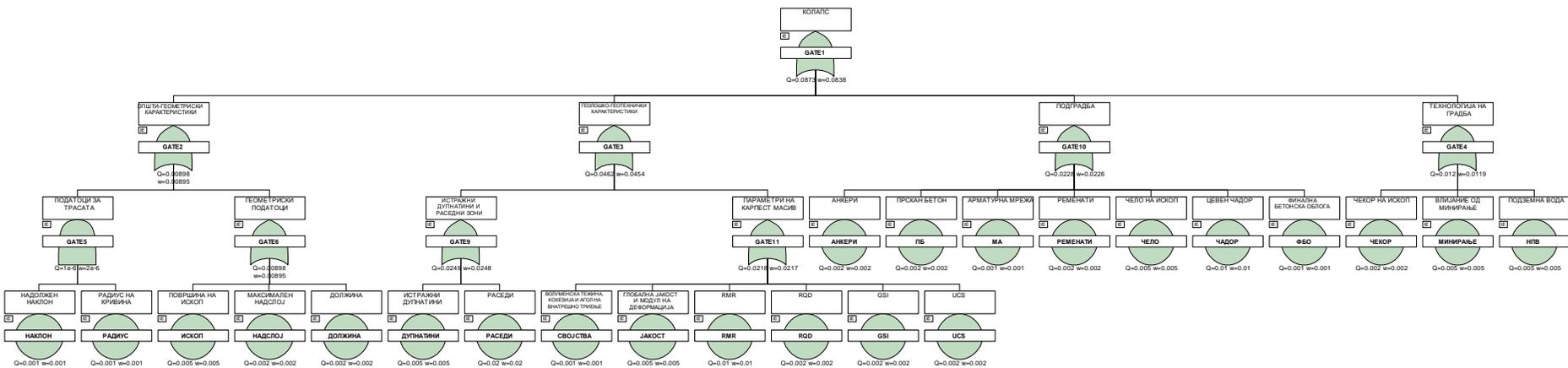
Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Модификација на ископ	Consequence	Result
--------	-------------	-------------------	-----------------------	-------------	--------



Дрво на настјани за колајс за тунел 15 од делница I

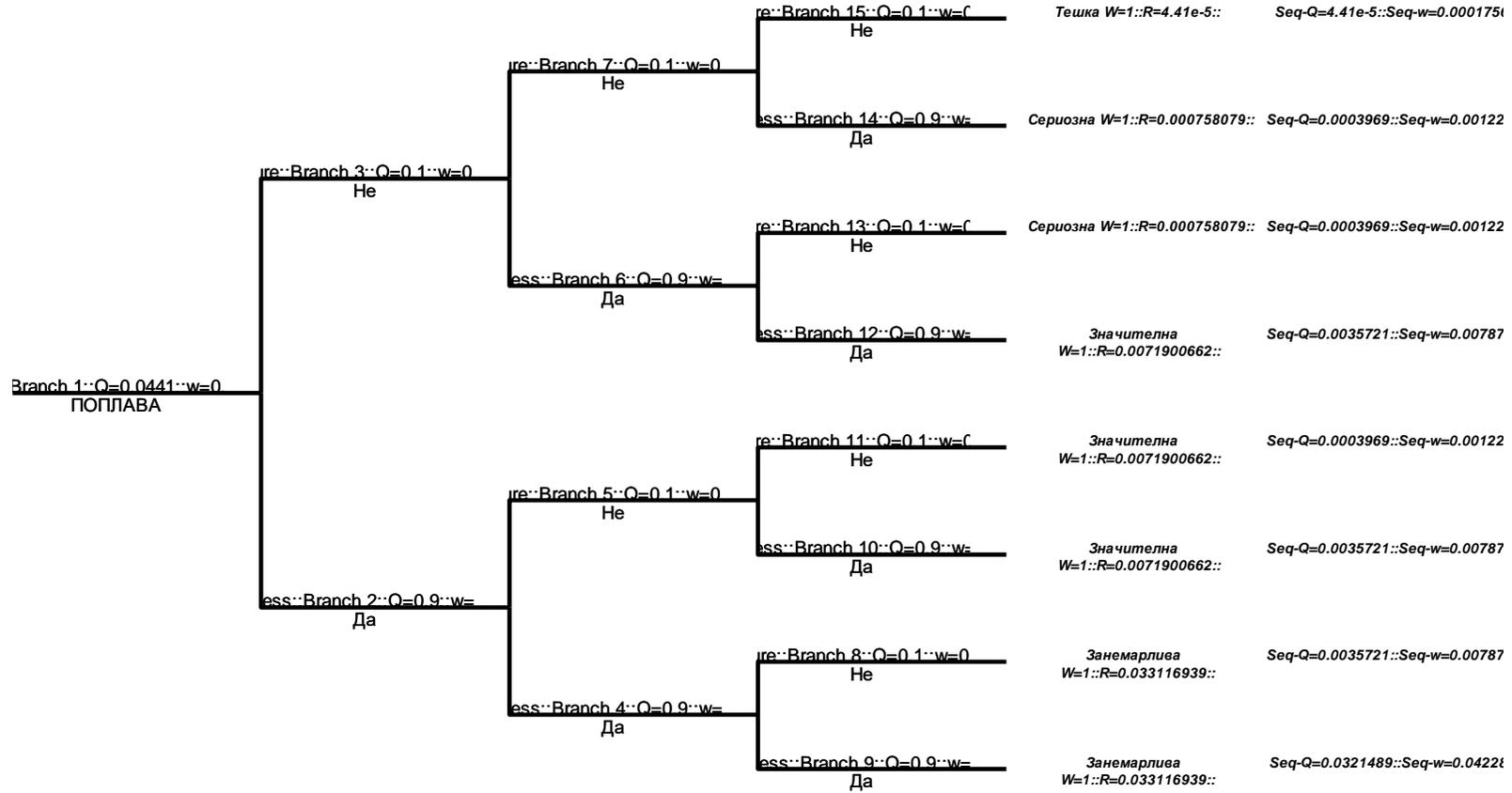


Дрво на грешки за поплава за тунел 1, 2, 3 и 4 од делница II



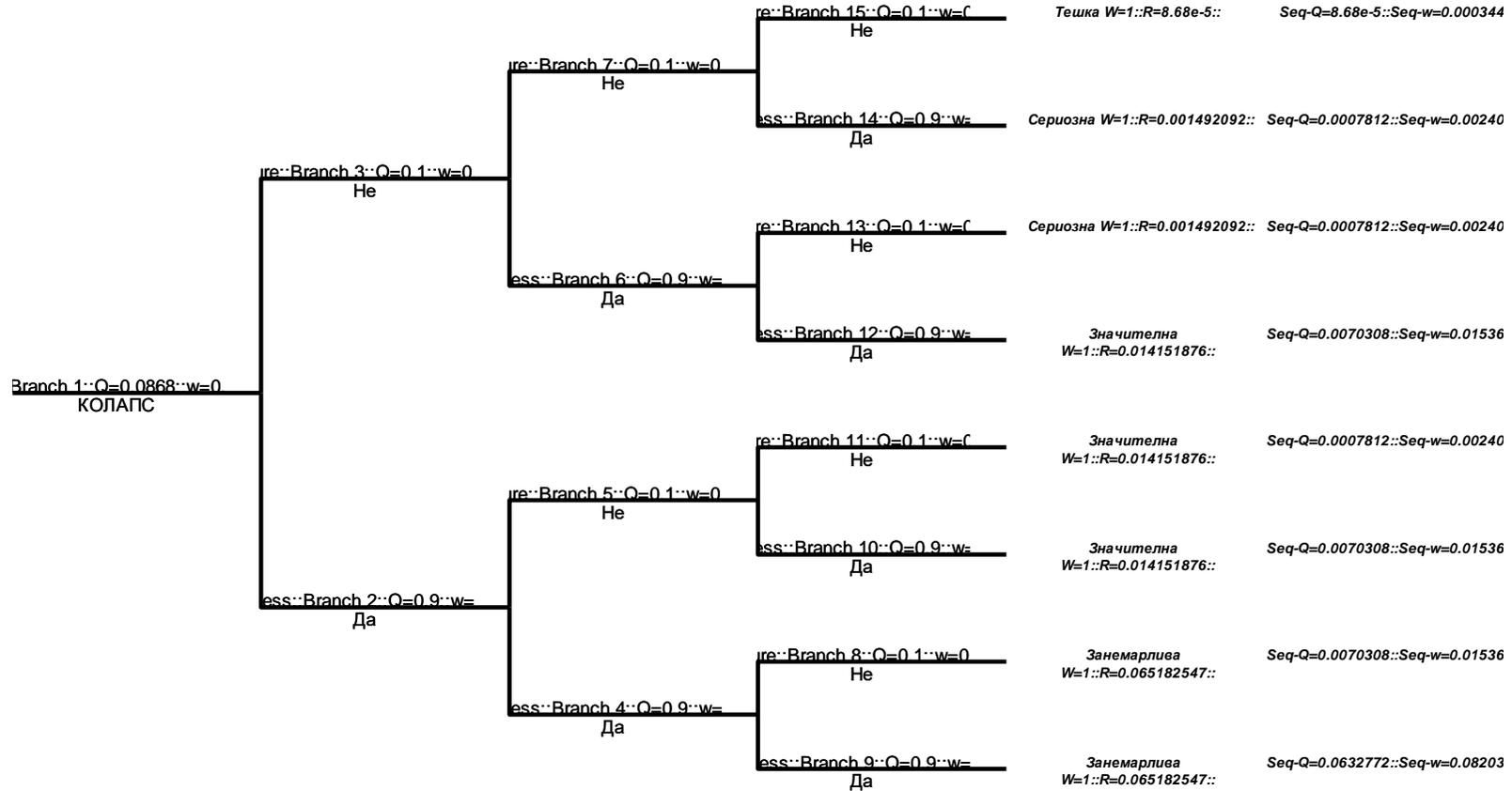
Дрво на грешки за колајс за тунел 1, 2, 3 и 4 од делница II

Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Дренаирање	Consequence	Result
Иницијален (врвен) настан					

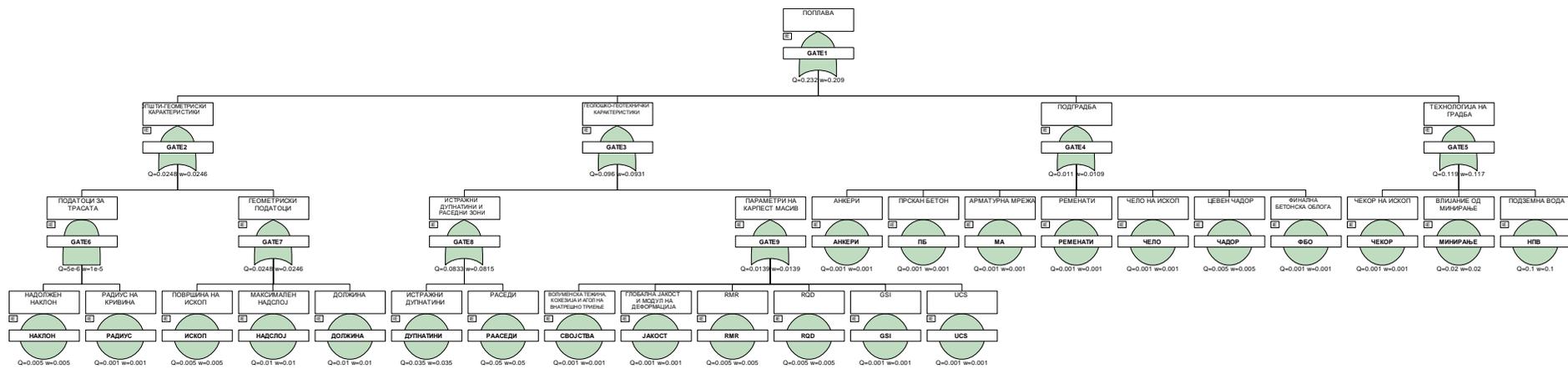


Дрво на настјани за поплава за тунел 1, 2, 3 и 4 од делница II

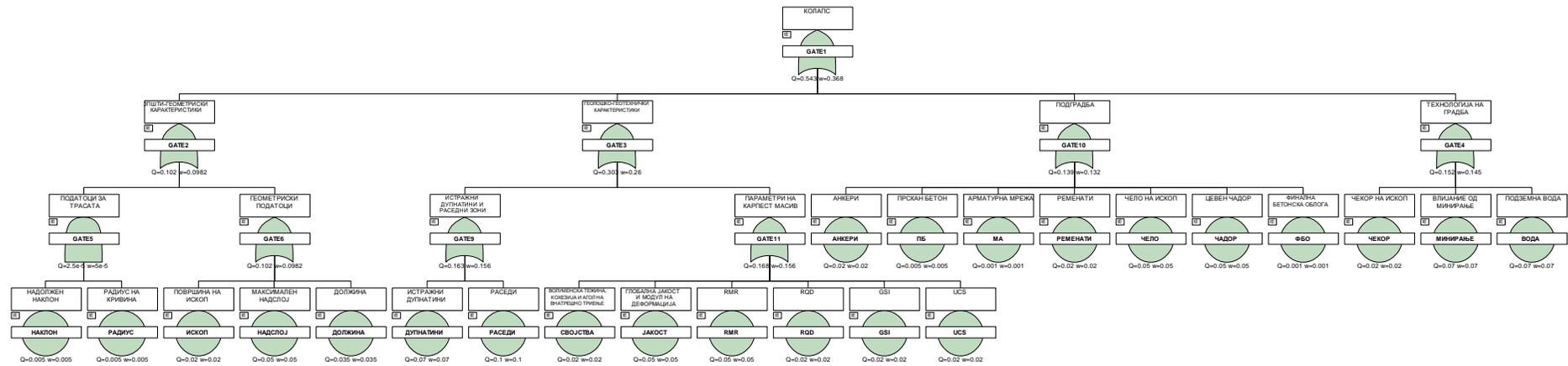
Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Модификација на ископ	Consequence	Result
Иницијален (врвен) настан					



Дрво на настани за колапс за тунел 1, 2, 3 и 4 од делница II

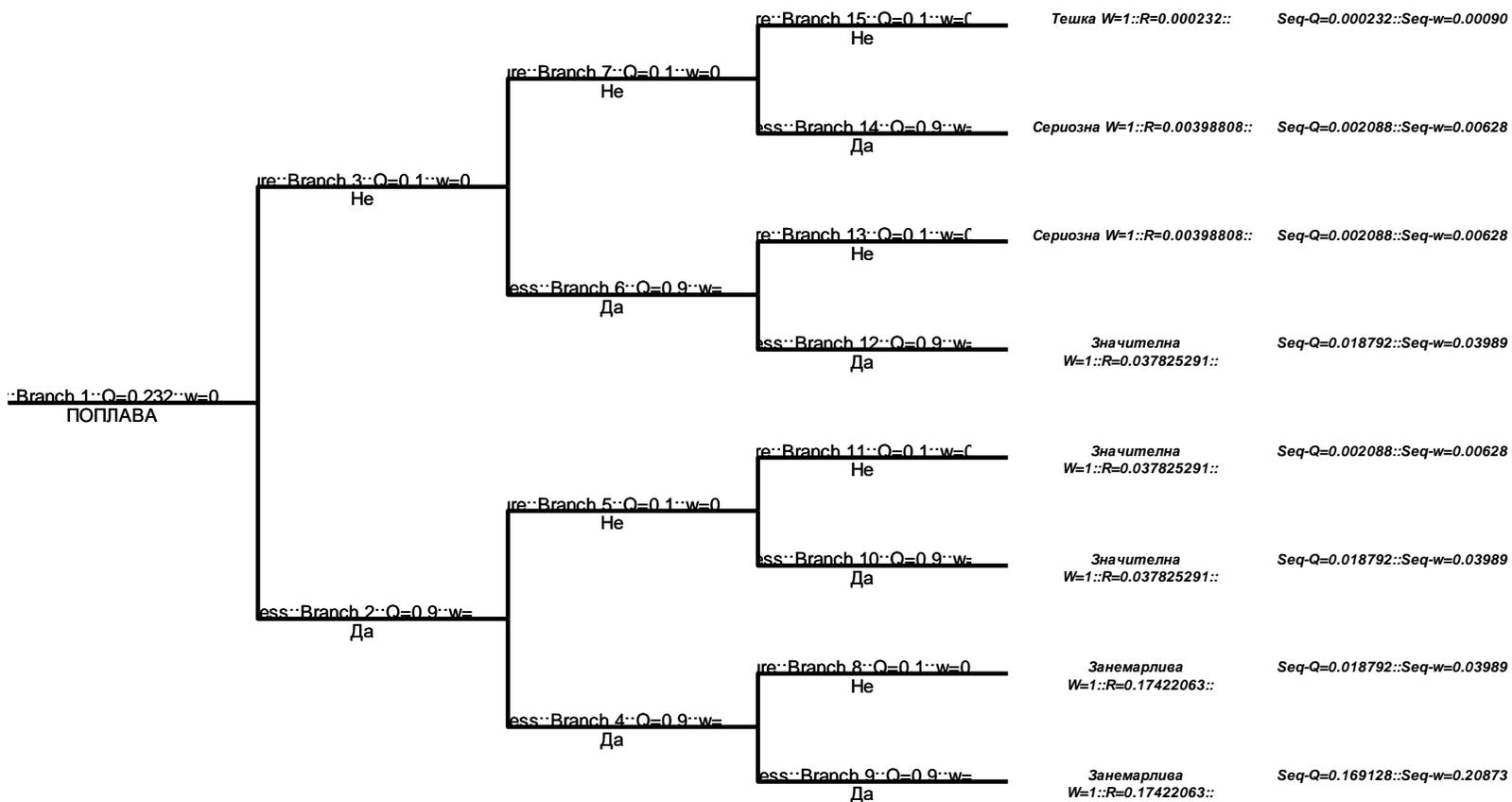


Дрво на грешки за поплава за тунел 19 и 20 од делница II



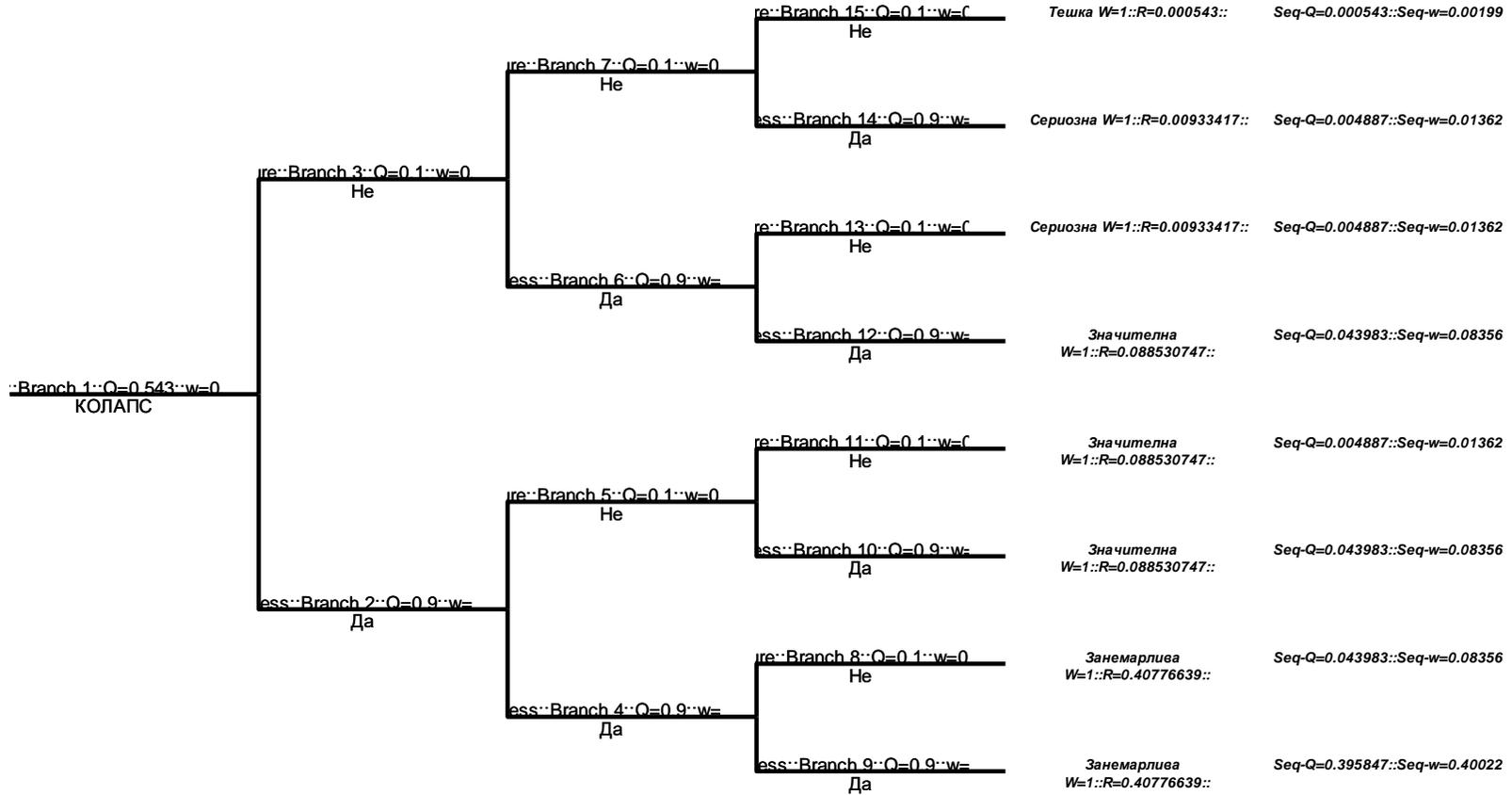
Дрво на грешки за колапс за тунел 19 и 20 од делница II

Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Дренаирање	Consequence	Result
Иницијален (врвен) настан					

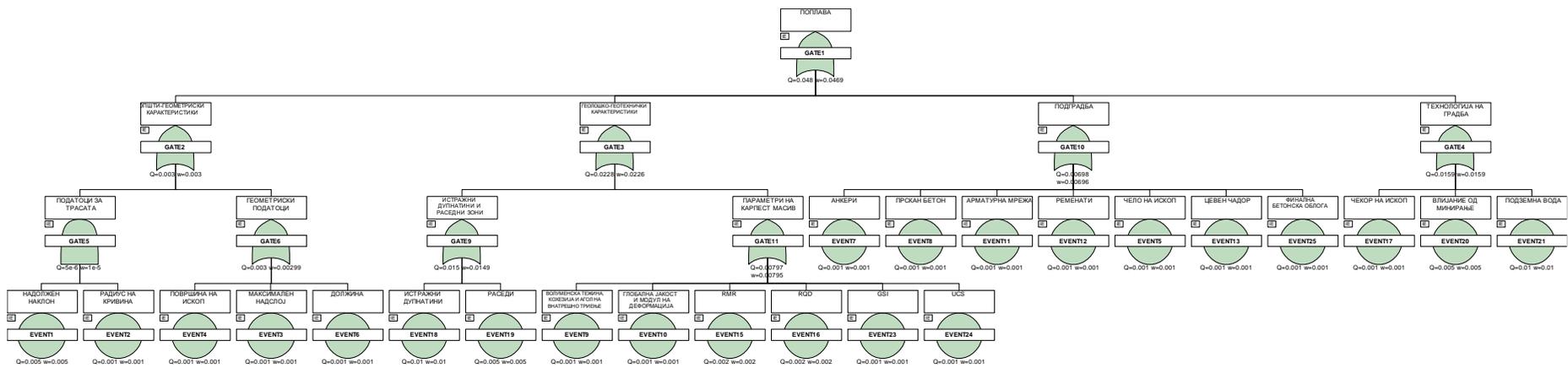


Дрво на настјани за поплава за тунел 19 и 20 од делница II

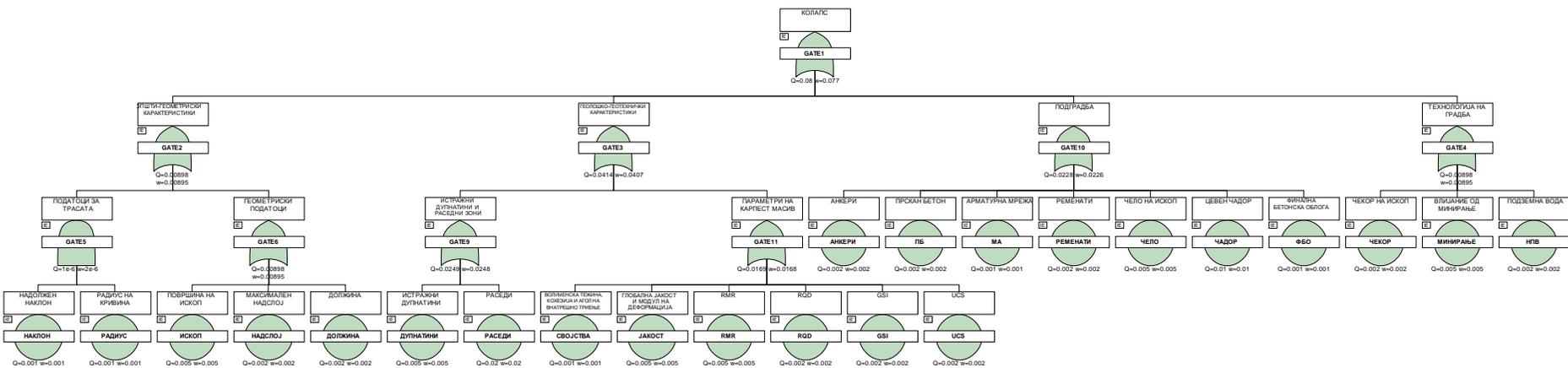
Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Модификација на ископ	Consequence	Result
Иницијален (врвен) настан					



Дрво на настани за колапс за тунел 19 и 20 од делница II

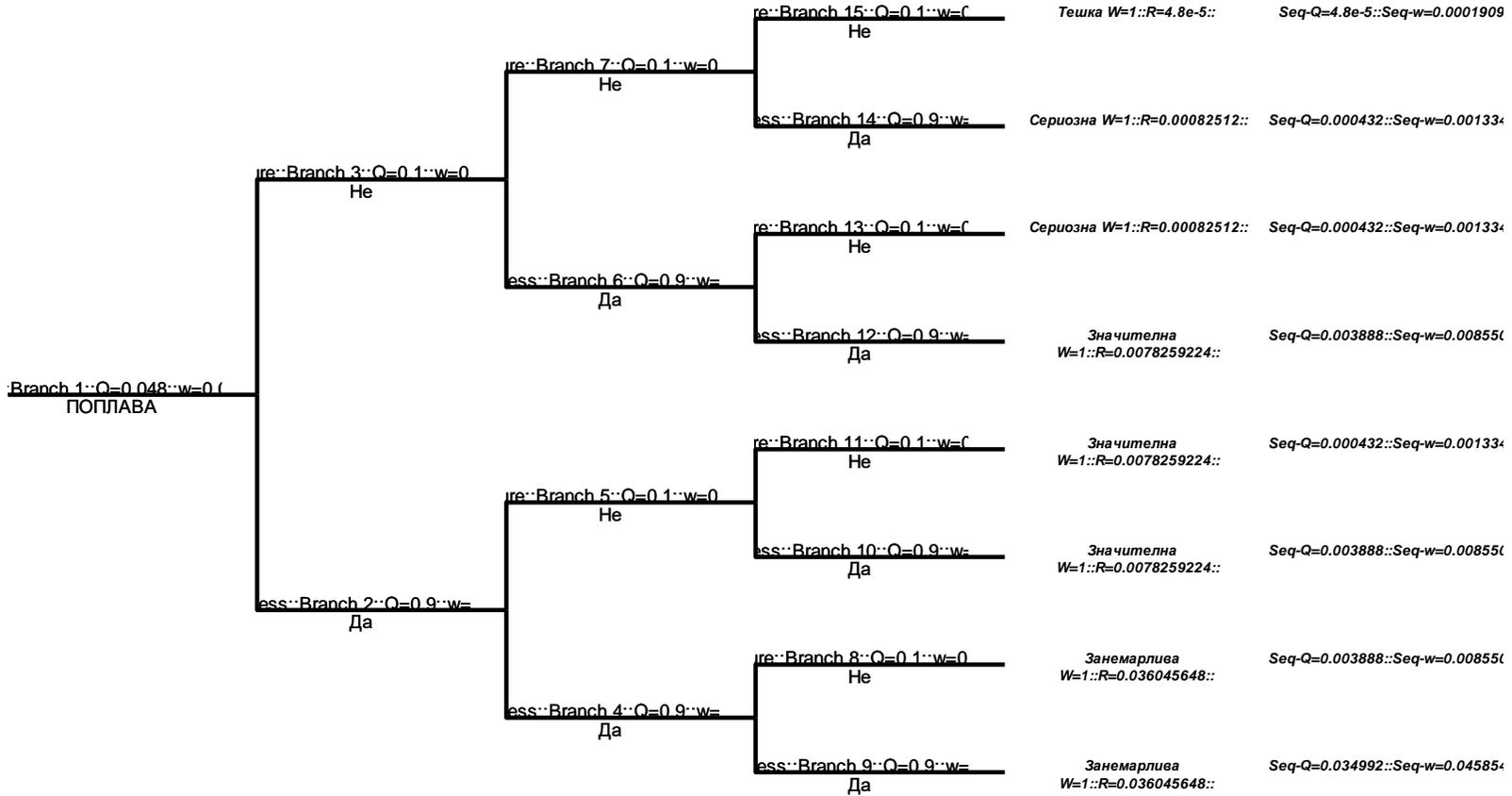


Дрво на грешки за поплава за тунел 2, 3 и 4 од делница III



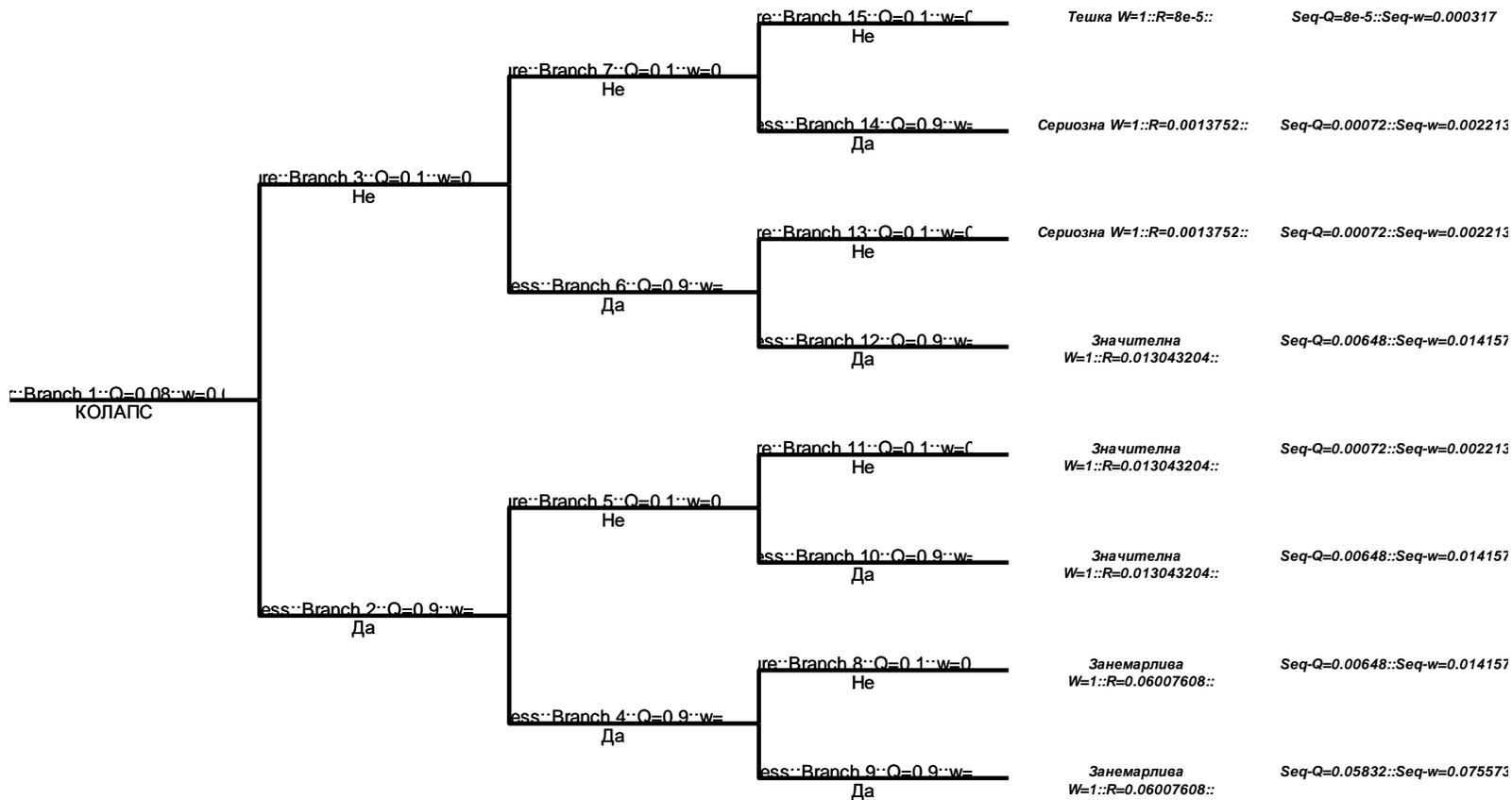
Дрво на грешки за колајс за тунел 2, 3 и 4 од делница III

Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Дренаирање	Consequence	Result
--------	-------------	-------------------	------------	-------------	--------



Дрво на настан за поплава за тунел 2, 3 и 4 од делница III

Хазард	Инјектирање	Претходна заштита	Модификација на ископ	Consequence	Result
Иницијален (врвен) настан					



Дрво на настани за колапс за тунел 2, 3 и 4 од делница III

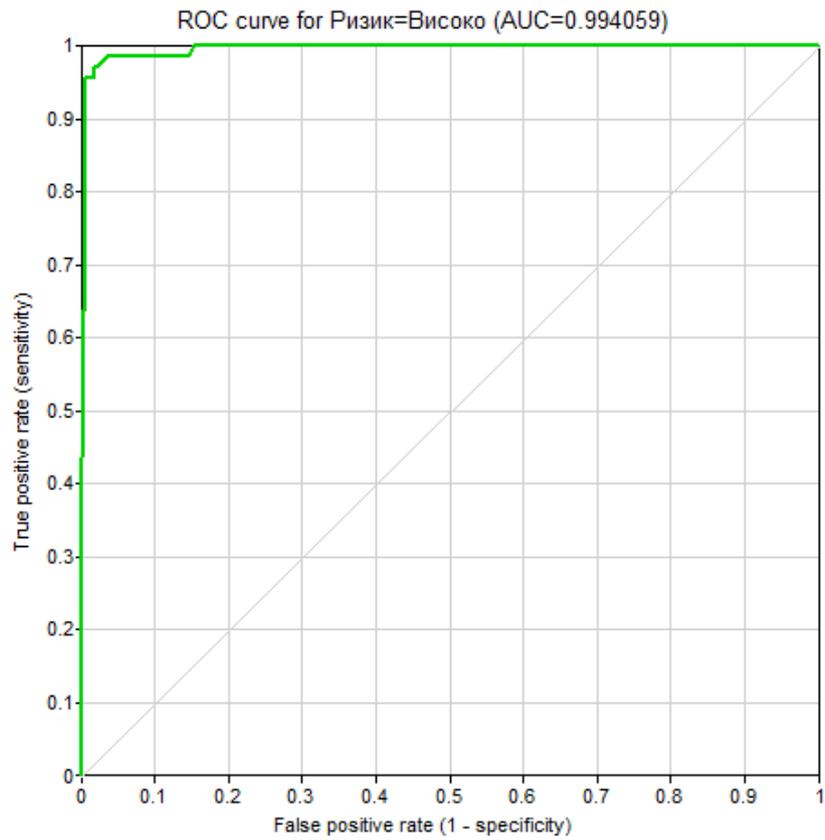
10.3 Карактеристики на моделите во однос на алгоритмите за машинско учење и Бајесовите мрежи

Модели без претходно проценети ризици (кластеризација)	
1. Random Forest	Random Forest Classifier n_estimators=400 random_state=42 criterion = "gini" max_features = "sqrt" bootstrap = True
2. XGBoost	XGBoost Classifier n_estimators=400 learning_rate=0.05 max_depth=6 subsample=0.9 colsample_bytree=0.9 reg_lambda=1.0 random_state=42 objective = "multi:softprob"
3. Neural Network	Neural Network Classifier build_mlp_weighted() epochs=60 batch_size=32 patience=8 hidden1=128 hidden2=64 dropout=0.20 activation = "relu" optimizer = Adam
4. Logistic regression	solver=lbfgs multi_class = "auto" max_iter=500 penalty=l2 random_state=42
Модели со претходно проценети квантитативни ризици	
1. Random Forest	Random Forest Regressor n_estimators": [50, 100, 200, 300] max_depth": [5, 10, 15, None] min_samples_split": [2, 5, 10] min_samples_leaf": [1, 2, 4] max_features": ["auto", "sqrt", "log2"] random_state=42
2. XGBoost	XGBoost Regressor objective="reg:squarederror" n_estimators=50 learning_rate=0.1 max_depth=3 random_state=42 booster = "gbtree"
3. Neural Network	Neural Network Regressor epochs=100 batch_size=16 patience=8 hidden1=64 hidden2=32 hidden3=16 dropout=0.2 activation = "relu" optimizer = Adam(lr=0.001)

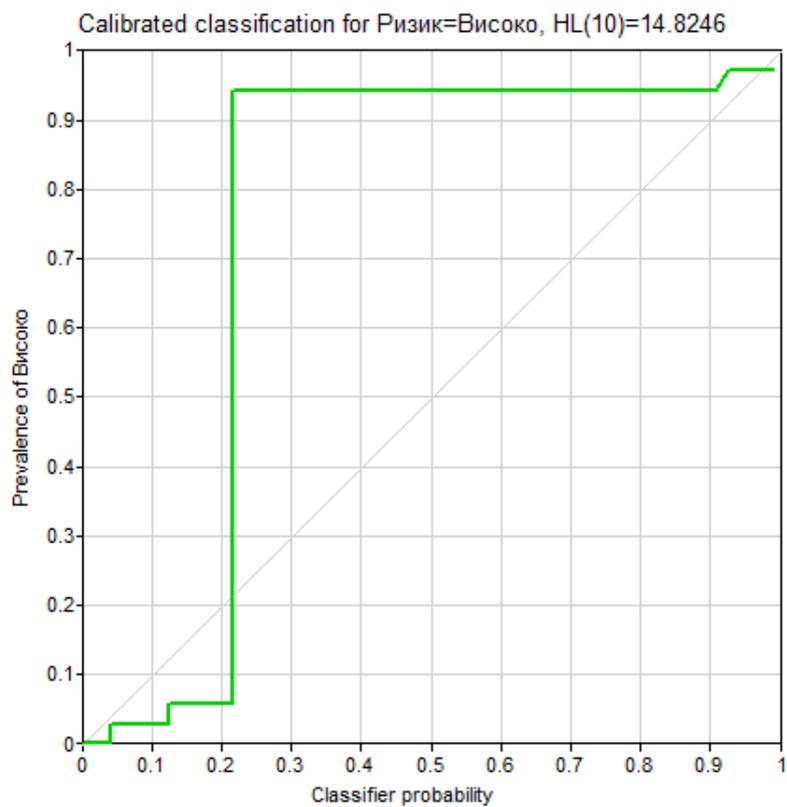
* сите модели ги делат податоците на тренинг (80%) и тест (20%)

Модели со претходно проценети квалитативни категории (Бајесови мрежи)	
1. GTT	Node count: 21 Avg indegree: 3.619 Max indegree: 10 Avg outcomes: 4.429 Max outcomes: 5 Nodes 21 (count) 93 (states) 12877161 / 9659853 (parameters/independent) Chance - General Arcs 76 Text boxes 1
2. PC	Node count: 21 Avg indegree: 1.619 Max indegree: 10 Avg outcomes: 4.429 Max outcomes: 5 Nodes 21 (count) 93 (states) 12802821 / 9602169 (parameters/independent) Chance - General Arcs 34 Text boxes 1
3. ANB	Node count: 21 Avg indegree: 3.333 Max indegree: 5 Avg outcomes: 4.429 Max outcomes: 5 Nodes 21 (count) 93 (states) 31820 / 25031 (parameters/independent) Chance - General Arcs 70 Text boxes 1
4. GTT модифиц.	Node count: 21 Avg indegree: 3.762 Max indegree: 10 Avg outcomes: 3 Max outcomes: 3 Nodes 21 (count) 63 (states) 244185 / 162790 (parameters/independent) Chance - General Arcs 79 Text boxes 1

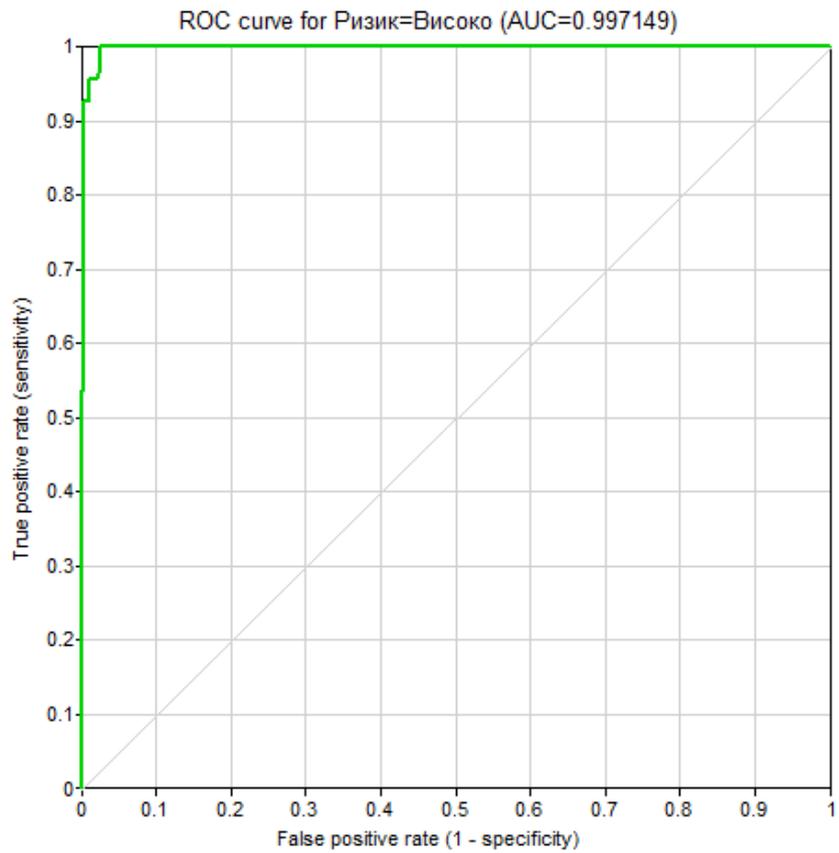
10.4 Криви на оперативна карактеристика на приемникот и сигурност/калибрација за висок ризик кај Бајесовите мрежи (ROC-Receiver Operating Characteristic curve & Reliability/Calibration curve)



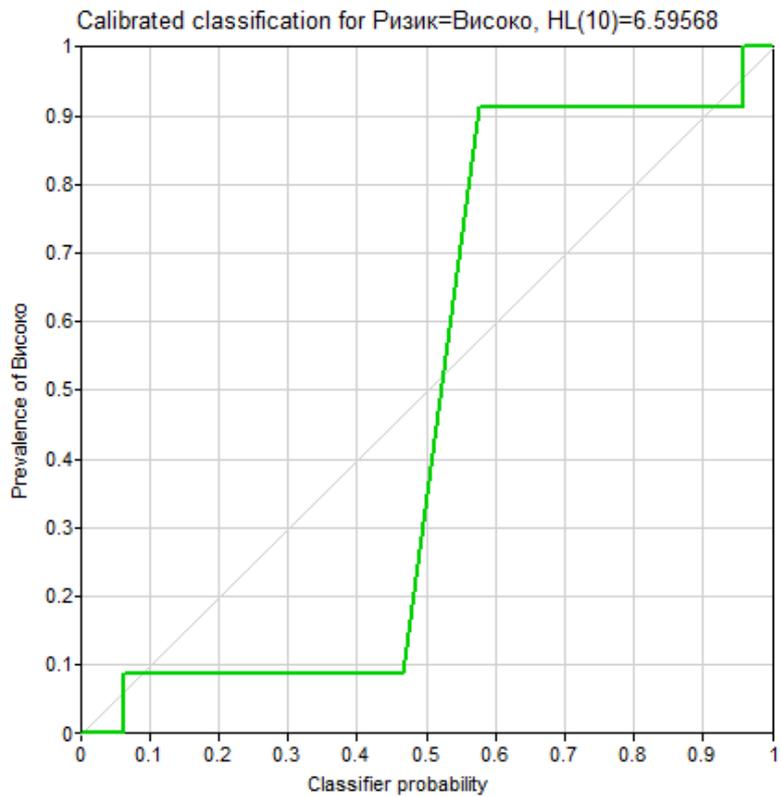
ROC крива за висок ризик кај Бајесова мрежа 1 (GTT алгоритам)



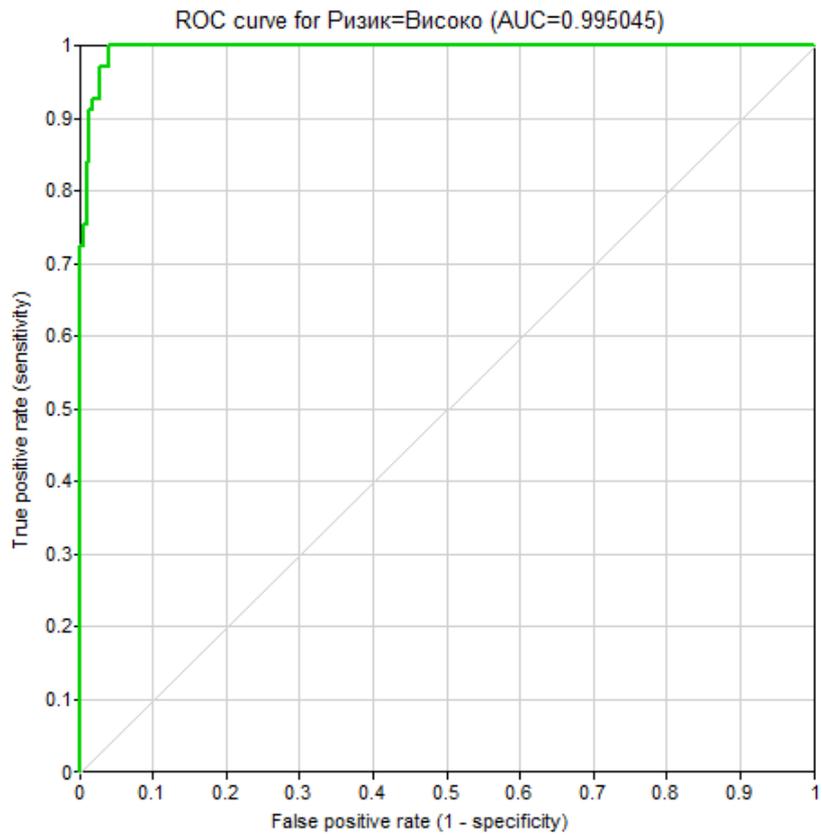
Калибрациска крива за висок ризик кај Бајесова мрежа 1 (GTT алгоритам)



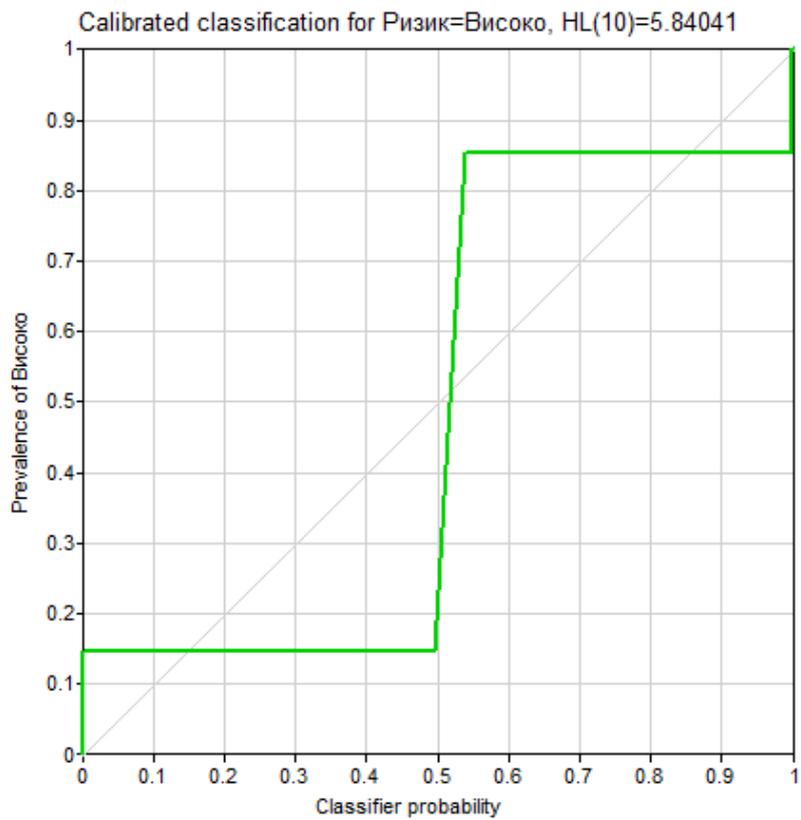
ROC крива за висок ризик кај Бајесова мрежа 2 (PC алгоритам)



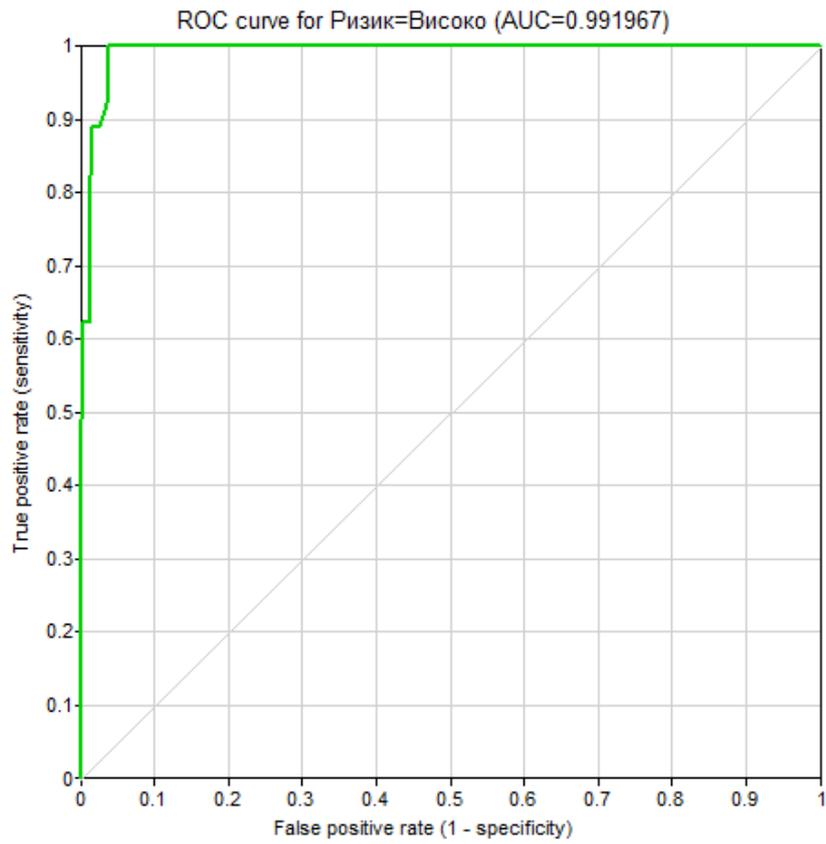
Калибрациска крива за висок ризик кај Бајесова мрежа 2 (PC алгоритам)



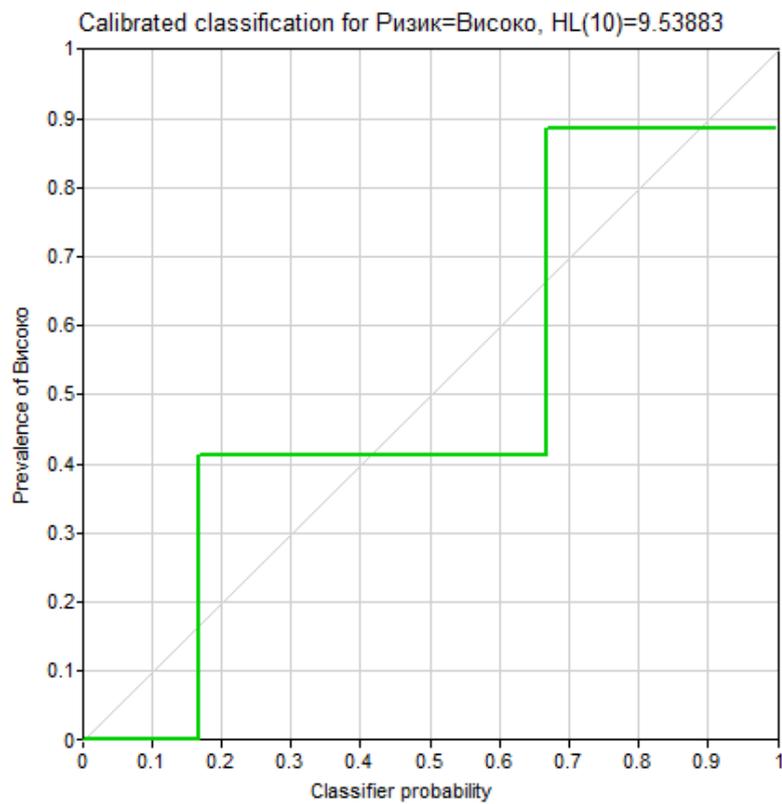
ROC крива за висок ризик кај Бајесова мрежа 3 (ANB алгоритам)



Калибрациска крива за висок ризик кај Бајесова мрежа 3 (ANB алгоритам)



ROC крива за висок ризик кај модифицирана Бајесова мрежа (GTT алгоритам)



Калибрациска крива за висок ризик кај модифицирана Бајесова мрежа (GTT алгоритам)