



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U NOVOM  
SADU



---

**MODEL ZA PROCENU I  
KOMPARACIJU RIZIKA OD NASTANKA  
NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO -  
PRUŽNIM PRELAZIMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:  
Prof. dr. Ilija Tanackov

Kandidat:  
mr Pamela Ercegovac

Novi Sad, 2021.

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У НОВОМ САДУ

ОБРАЗАЦ – 5а

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА<sup>1</sup>

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Памела Ерцеговац
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	др Илија Танацков, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Модел за процену и компарацију ризика од настанка несрећа и незгода на путно-пружним прелазима
Језик публикације (писмо):	Српски језик (латиница)
Физички опис рада:	Страница: 142 Поглавља: 8 Референци: 185 Табела: 17 Слика: 42 Графикона: 5 Прилога: 1
Научна област:	Саобраћајно инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Железнички саобраћај, безбедност железничког саобраћаја
Кључне речи / предметна одредница:	Несреће и незгоде на путно-пружним прелазима
Резиме на језику рада:	У раду је одређен математички модел са циљем прорачуна максималног ризика и утврђивања поузданости путно-пружних прелаза. У дефинисаном инжењерском оквиру, од детерминистичке до стохастичке границе апстрактног броја несрећа и незгода, налази се пропорција за естимацију и компарацију ризика од настанка незгода и несрећа на путно-пружним прелазима заснована на реалним догађајима. Могуће је утврђивање нивоа безбедности за сваки путни прелаз појединачно, што представља оригинални допринос у истраживањима безбедности на местима укрштаја железничког и друмског саобраћаја.
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	27.06.2019. године

<sup>1</sup> Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штапане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штапаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: др Гордан Стојић, редовни професор, ФТН Нови Сад Члан: др Драган Јовановић, редовни професор, ФТН Нови Сад Члан: др Норберт Павловић, ванредни професор, СФ Београд Члан: др Жељко Стевић, доцент, СФ Добој Члан, ментор: др Илија Танацков, редовни професор, ФТН Нови Сад
Напомена:	

UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

FORM – 5a

KEY WORD DOCUMENTATION<sup>2</sup>

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Pamela Ercegovac
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	PhD Ilija Tanackov, Full Professor, Faculty of Tehnical Sciences Novi Sad
Thesis title:	Model for estimating and comparing the risk of occurrence accidents and incidents on the level crossings
Language of text (script):	Serbian language (latin)
Physical description:	Pages: 142 Chapters: 8 References:185 Tables: 17 Illustration: 42 Graph: 5 Appendices: 1
Scientific field:	Traffic Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Railway traffic, railway traffic safety
Subject, Key words:	Accidents and incidents on the level crossing
Abstract in English language:	This paper is determined a mathematical model to calculate the maximum risk and determine the reliability of level crossings. In the strongly defined engineering framework, from the deterministic to the stochastic limit of the number of theoretical accidents and incidents, there is a proportion for estimating and comparing the risk of accidents and incidents at level crossings based on real occurrences. It is possible to determine the level of safety for each railroad crossing individually, which is an original contribution to safety research at the intersections of railway and road traffic.
Accepted on Scientific Board on:	06/27/2019

<sup>2</sup> The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at he faculty and are not included into the printed thesis.

---

Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	President: PhD Gordan Stojić, Full Professor, FTN Novi Sad Member: PhD Dragan Jovanović, Full Professor, FTN Novi Sad Member: PhD Norbert Pavlović, Associate Professor, SF Beograd Member: PhD Željko Stević, Docent, SF Doboj Member, Mentor: PhD Ilija Tanackov, Full Professor, FTN Novi Sad
Note:	

## ZAHVALNICA

Najveću zahvalnost dugujem mentoru **prof. dr Iliji Tanackovu**, na nesebičnom, visoko sofisticiranom i duboko humanom pristupu naučno-istraživačkom radu i usmeravanju mene kao doktoranta kroz ove doktorske studije.

Bez njegovog beskrajnog strpljenja, ogromne pomoći i podrške, saveta, kao i motivacije, ovaj predstavljeni istraživački rad i doktorska disertacija ne bi bili mogući.

Pored mog mentora, zahvaljujem se svim profesorima na Departmanu za saobraćaj Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu sa kojima sam sarađivala, a posebno rukovodiocu doktorskih studija FTN Novi Sad, **prof. dr Gordanu Stojiću**.

**SADRŽAJ**

<b>REZIME .....</b>	<b>X</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XI</b>
<b>SPISAK SLIKA I GRAFIKONA .....</b>	<b>XII</b>
<b>SPISAK TABELA .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1. UVODNA RAZMATRANJA.....</b>	<b>1</b>
1.1. UVOD .....	1
1.2. OBRAZLOŽENJE TEME, PREDMETA I OKVIRA ISTRAŽIVANJA .....	2
1.3. CILJ ISTRAŽIVANJA .....	3
1.4. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA.....	4
1.5. PREGLED VLADAJUĆIH STAVOVA U LITERATURI.....	4
1.6. NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA.....	8
1.7. STRUKTURA DOKTORSKE DISERTACIJE .....	9
1.8. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE) .....	10
<b>2. BEZBEDNOST NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA, DEFINICIJA I KARAKTERISTIKE .....</b>	<b>15</b>
2.1. POJAM NESREĆA I NEZGODA .....	15
2.2. OSNOVNA DEFINICIJA PUTNO-PRUŽNOG PRELAZA I PROPISI KOJI REGULIŠU OBLAST UPRAVLJANJA SAOBRAĆAJEM NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA .....	16
2.3. PRIKAZ STANJA BEZBEDNOSTI NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U REPUBLICI SRBIJI I ZEMLJAMA U OKRUŽENJU .....	25
2.4. MERE ZA PODIZANJE BEZBEDNOSTI NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA.....	29
2.5. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE) .....	32
<b>3. MODELI ZA PREDVIĐANJE NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA-PREGLED LITERATURE .....</b>	<b>34</b>
3.1. UVOD.....	34
3.2. MODELI ZA PREDVIĐANJE NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U SJEDINJENIM AMERIČKIM DRŽAVAMA .....	37
3.3. MODELI ZA PREDVIĐANJE NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U FRANCUSKOJ.....	42

3.4. MODELI ZA PREDVIĐANJE NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U MAĐARSKOJ .....	45
3.5. REFERENCE.....	48
<b>4. SISTEMI MASOVNOG OPSLUŽIVANJA (SMO), TEORIJSKE OSNOVE .....</b>	<b>52</b>
4.1. PREGLED RASPODELA I STOHAŠTIČKIH (SLUČAJNIH) PROCESA .....	52
4.1.1. Poasonova, eksponencijalna i Erlangova raspodela .....	52
4.1.2. Stohastički (slučajni) procesi.....	57
4.1.3. Lanci Markova.....	57
4.1.4. Teorijski primer rešenja sistema diferencijalnih jednačina na jednom prostom diskretnom sistemu u kojem protiče Markovljev proces sa neprekidnim vremenom .....	62
4.2. UVOD U TEORIJU SERVISNIH SISTEMA (REDOVA ČEKANJA) .....	64
4.2.1. Fenomen sistema redova čekanja .....	64
4.2.2. Osnovne definicije i oznake .....	65
4.2.3. Model M/M/1 .....	69
4.2.3.1. Little-ov zakon .....	72
4.2.3.2. Formule za osnovne izlazne veličine modela M/M/1 sistema masovnog opsluživanja .....	74
4.3. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE) .....	74
<b>5. RAZVOJ KOMPONENTI MODELA ZA PROCENU I KOMPARACIJU RIZIKA OD NASTANKA NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U REPUBLICI SRBIJI.....</b>	<b>79</b>
5.1. OPIS IZVORA PODATAKA.....	79
5.1.1. Podaci o putno-pružnim prelazima.....	79
5.1.2. Podaci o nesrećama i nezgodama .....	82
5.1.3. Podaci o frekvenciji drumskog i železničkog saobraćaja .....	85
5.2. STATISTIČKA ANALIZA SAOBRAĆAJNIH NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA „INFRASTRUKTURA ŽELEZNICE SRBIJE” a.d. U PERIODU OD 2007. DO 2017. GODINE .....	87
5.3. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE) .....	95
<b>6. MODEL ZA PROCENU I KOMPARACIJU RIZIKA OD NASTANKA NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA.....</b>	<b>96</b>
6.1. OSNOVE MODELA: MAKSIMALAN RIZIK, ENTROPIJA I HAOS .....	96
6.2. SISTEM MASOVNOG OPSLUŽIVANJA IDEALNOG PUTNOG PRELAZA.....	99
6.2.1. Osnova modela, graf stanja, objašnjenje stanja, proračun verovatnoća stanja .....	99



6.3. SISTEM MASOVNOG OPSLUŽIVANJA ZA PRORAČUN MAKSIMALNOG RIZIKA .....	100
6.4. TESTIRANJE MODELA NA ODABRANIM PUTNIM PRELAZIMA .....	108
6.4.1. Putno-pružni prelaz Buđanovci u km 3+285, pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS) .....	108
6.4.2. Putno-pružni prelaz Platičevo u km 21+465, pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS) .....	110
6.4.3. Putno-pružni prelaz Štitar u km 8+151, pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS) .....	111
6.4.4. Putno-pružni prelaz Brasina u km 66+207, pruge pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS) .....	112
6.4.5. Putno-pružni prelaz Kraljevci u km 62+008, magistralne pruge Beograd Centar-Stara Pazova–Šid-drž.granica (Tovarnik, HŽ).....	113
6.5. DISKUSIJA .....	115
Grafik 6.1. Komparacija nivoa bezbednosti, odnosno sintetičke pouzdanosti (R) za pet putno-pružnih prelaza .	116
Grafik 6.2. Pregled vrednosti rizika (r) za posmatrane putno-pružne prelaze.....	117
6.5.1. Predlog poboljšanja nivoa bezbednosti na putno-pružnom prelazu „Buđanovci” sa detaljnim opisom tehničko-tehnoloških karakteristika mesta ukrštaja i ovog dela pruge .....	118
6.6. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE) .....	124
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>126</b>
7.1. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE) .....	129
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>130</b>
<b>PRILOG: PLAN TRETMANA PODATAKA .....</b>	<b>i</b>

## REZIME

Ova doktorska disertacija se bavi bezbednošću saobraćaja na putno-pružnim prelazima. Društveni troškovi nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima su veoma visoki i dovode do smanjenja nivoa bezbednosti saobraćaja.

Pored posledica koje se ogledaju u gubicima ljudskih života, povredama i invaliditetu, stresu i traumama direktnih učesnika u izvršenju saobraćaja, nesreće i nezgode na putno-pružnim prelazima izazivaju značajna primarna i sekundarna kašnjenja u saobraćaju, kao i ogromne imovinske i ekonomske gubitke.

Ni jedna država na svetu nije toliko bogata da može obezbediti ukidanje svih putno-pružnih prelaza ili njihovu denivelaciju. Samo u Republici Srbiji, najveći broj nesreća i nezgoda se dogodi na pasivnim prelazima, koji čine tri četvrtine od ukupnog broja prelaza.

Prema dostupnoj svetskoj literaturi, većina modela saobraćajnih nesreća razvijena je na osnovu tehnika statističke regresije. Veliki broj postojećih modela bazira se na analizama pojave nesreća i nezgoda koje su se dogodile u prošlosti, kao i praćenju efekata pre i posle sprovođenja određenih mera, tako da se ukazala potreba za pronalaženjem novog modela, što ova doktorska disertacija pruža.

U disertaciji je predstavljen model koji omogućava utvrđivanje nivoa bezbednosti za svaki putno-pružni prelaz pojedinačno, što predstavlja nov i originalan doprinos u istraživanjima bezbednosti saobraćaja na putno-pružnim prelazima. Kao osnovna metoda korišćena je teorija masovnog opsluživanja „queueing theory”.

Model servisnog sistema, u posmatranom slučaju, putno-pružnog prelaza je M/M/1. Tok dolazaka drumskih i železničkih vozila je Poissonov, obrada korisnika, odnosno posluživanje sistema ima eksponencijalnu raspodelu, a kapacitet „čekaonice” je beskonačan.

Sistem je markovski i rešava se standardnim analitičkim konceptom. Osnovni ulazni parametri za proračun maksimalnog rizika su geometrijske karakteristike putno-pružnog prelaza, intenziteti opsluge i struktura tokova drumskih i železničkih vozila ( $\mu_c$ ,  $\mu_t$ ,  $\lambda_c$  i  $\lambda_t$ ). Realan rizik ( $p_{\text{real}}$ ) je zasnovan na statističkoj evidenciji nesreća/nezgoda i intenziteta tokova. Iz odnosa realnog ( $p_{\text{real}}$ ) i maksimalnog rizika ( $p_{\text{theor}}$ ) proračunava se egzaktna pouzdanost putno-pružnih prelaza, što omogućava njihovu dalju komparaciju, a to i jeste osnovna ideja ove doktorske disertacije.

Model je testiran na pet putno-pružnih prelaza na prugama „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. sa statističkom evidencijom nesreća/nezgoda i intenzitetom saobraćajnih tokova za period od 2007. godine do 2017. godine i prema dobijenim rezultatima izvršeno je rangiranje putno-pružnih prelaza.

## ABSTRACT

This doctoral thesis deals with traffic safety at level crossings. The social costs of accidents at level crossings are very high and lead to a reduction in the levels of traffic safety.

In addition to the consequences reflected in the loss of human lives, injuries and disabilities, stress and trauma of direct participants in traffic, accidents at level crossings cause significant primary and secondary delays in traffic, as well as huge property and economic losses.

There isn't a single country in the world that is so rich that it can remove all level crossings or provide their denivelation. In the Republic of Serbia alone, the largest number of accidents occur at passive crossings, which make up three-quarters of the total number of crossings.

In the available world literature, most traffic accident models have been developed based on statistical regression techniques. Many of the existing models are based on analyzes of accidents and incidents that have occurred in the past, as well as monitoring the effects before and after the implementation of certain measures, so there is a need to find a new model, which this doctoral dissertation provides.

The dissertation presents a model that allows determining the levels of safety for each level crossing individually, which is a new and original contribution to research on traffic safety at level crossings. The queueing theory was used as the basic method.

The model of the service system, in the observed case, of the level crossing is M/M/1. The flow of arrivals of road and railway vehicles is Poisson's, the service intensity has an exponential distribution, and the capacity of the "waiting room" is infinite.

The system is Markov's and is solved by a standard analytical concept. The basic input parameters for the calculation of maximum risk are the geometric characteristics of the level crossing, service intensities, and flow of road and railway vehicles ( $\mu_c$ ,  $\mu_t$ ,  $\lambda_c$  and  $\lambda_t$ ). The real risk ( $p_{\text{real}}$ ) is based on statistical records of accidents and flow intensities. The exact reliability of level crossings is calculated from the ratio of real ( $p_{\text{real}}$ ) and maximum risk ( $p_{\text{theor}}$ ), which enables their further comparison, and that is the basic idea of this doctoral dissertation.

The model was tested at five level crossings on the lines Joint Stock Company for Public Railway Infrastructure Management "Serbian Railway Infrastructure" with statistical data of accidents and the intensity of traffic flows for the period from 2007 to 2017, and according to the obtained results, and according to the obtained results, the ranking of level crossings was performed.

## SPISAK SLIKA I GRAFIKONA

<u>Slika 2.1.</u> Saobraćajni znak: „Ukrštanje puta sa železničkom prugom bez branika ili polubranika” (I-33) .....	18
<u>Slika 2.2.</u> Saobraćajni znak: „Približavanje mestu ukrštanja puta i železničke pruge” (I-35) .....	19
<u>Slika 2.3.</u> Saobraćajni znak: „Andrejin krst” nailazak na ukrštanje puta i železničke pruge u nivou sa jednim kolosekom (I-34), odnosno sa dva ili više koloseka (I-34.1) .....	19
<u>Slika 2.4.</u> Saobraćajni znak: „Obavezno zaustavljanje” (II-2).....	19
<u>Slika 2.5.</u> Saobraćajni znak: „Semafor za regulisanje prelaza puta preko železničke pruge u istom nivou” (VI-9).....	20
<u>Slika 2.6.</u> Saobraćajni znak: „Ukrštanje puta sa železničkom prugom sa branicima ili polubranicima” (I-32) .....	20
<u>Slika 2.7.</u> Signalni znak 55: „Uređaj na putnom prelazu u kvaru” .....	22
<u>Slika 2.8.</u> Signalni znak 56: „Uređaj na putnom prelazu ispravan” .....	23
<u>Slika 2.9.</u> Pomoćni kontrolni signal .....	23
<u>Slika 2.10.</u> Signalni znak 57: „Uključna tačka, očekuj kontrolni signal” .....	23
<u>Slika 2.11.</u> Signalni znak 57a: „Uključna tačka sa daljinskom kontrolom” .....	24
<u>Slika 2.12.</u> Signalni znak 58: „Početak zaustavnog puta ispred putnog prelaza”.....	24
<u>Slika 2.13.</u> Signalna oznaka 209: „Pazi, putni prelaz”.....	25
<u>Grafik 2.1.</u> Broj nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima na 1.000 prelaza - Srbija i EU, 2010-2014 .....	27
<u>Grafik 2.2.</u> Broj nastradalih u nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima na 1.000 prelaza - Srbija i EU, 2010-2014 .....	28
<u>Grafik 2.3.</u> Broj usmrćenih u nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima na 1.000 prelaza - Srbija i EU, 2010-2014.....	29
<u>Slika 3.1.</u> Težina komponenti za rangiranje iz 2015. ....	47
<u>Slika 3.2.</u> Rangiranje 400 prelaza u nivou prema detaljnim parametrima ( x-osa) i smanjenim parametrima (y-osa) .....	47
<u>Slika 4.1.</u> Stablnost Puasonovih potoka, generalni koncept .....	54
<u>Slika 4.2.</u> Prost graf dva stanja .....	62
<u>Slika 4.3.</u> Opšti model servisnog sistema .....	67
<u>Slika 4.4.</u> Servisni sistem M/M/1 .....	68
<u>Slika 4.5.</u> Grafički prikaz osnovnih veličina u modelu opsluživanja M/M/1 .....	72
<u>Slika 4.6.</u> Dijagram stanja sistema opsluživanja M/M/1 .....	74
<u>Slika 5.1.</u> Izvod iz dela baze podataka, tačnije Evidencije putnih prelaza Sektora za građevinske poslove Beograd) .....	80
<u>Slika 5.2.</u> Pregled ukupnog broja putno-pružnih prelaza u „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. 2017.godine sa različitim nivoima obezbeđenja .....	81

<u>Slika 5.3.</u> Pregled odnosa ukupnog broja nesreća i nezgoda (SN) i broja nesreća i nezgoda (SN) koje su se desile samo na putno-pružnim prelazima za period 2007-2017. ....	82
<u>Slika 5.4.</u> Izvod iz dela filtriranog S-80 za 2007.godinu, koji se odnosi na nesreće i nezgode samo na putno-pružnim prelazima .....	84
<u>Slika 5.5.</u> Print Screen izvoda iz tabelarnog pregleda za 2013.godinu, koji se odnosi na PGDS na državnim putevima II reda).....	86
<u>Slika 5.6.</u> Verifikacija nesignifikantne Poisson-ove raspodele saobraćajnih nezgoda na putnim prelazima „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. ....	88
<u>Slika 5.7.</u> Linearna korelacija poginulih i povređenih učesnika u saobraćajnim nezgodama na putno-pružnim prelazima.....	90
<u>Slika 5.8.</u> Neravnomerne raspodele saobraćajnih nesreća i nezgoda po mesecima u godini i časovima u danu .....	91
<u>Slika 5.9.</u> Aprosimitivni grafik broja saobraćajnih nezgoda u funkciji meseca u godini i časa u danu .....	92
<u>Slika 5.10.</u> Konturni dijagram broja saobraćajnih nesreća i nezgoda u funkciji meseca u godini i časa u danu sa naglašenom astronomskom granicom dana i noći .....	92
<u>Slika 5.11.</u> Linearna korelacija poginulih i povređenih u saobraćajnim nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. ....	94
<u>Slika 6.1.</u> Sistem masovnog opsluživanja putno-pružnog prelaza sa bezuslovnim prioritetom .....	99
<u>Slika 6.2.</u> Geometrijska interpretacija verovatnoća zauzetosti putno-pružnog prelaza .....	99
<u>Slika 6.3.</u> Ključni geometrijski parametri .....	101
<u>Slika 6.4.</u> Moguća stanja heterogenog sistema putnog prelaza .....	102
<u>Slika 6.5.</u> Graf stanja putno-pružnog prelaza .....	102
<u>Slika 6.6.</u> Satelitski snimak putnog prelaza „Buđanovci“ .....	109
<u>Slika 6.7.</u> Satelitski snimak putnog prelaza „Platičevo“ .....	110
<u>Slika 6.8.</u> Satelitski snimak putnog prelaza „Štitar“ .....	111
<u>Slika 6.9.</u> Satelitski snimak putnog prelaza „Brasina“ .....	113
<u>Slika 6.10.</u> Satelitski snimak putnog prelaza „Kraljevci“ .....	114
<u>Grafik 6.1.</u> Komparacija nivoa bezbednosti, odnosno sintetičke pouzdanosti (R) za pet putno-pružnih prelaza .....	116
<u>Grafik 6.2.</u> Pregled vrednosti rizika (r) za posmatrane putno-pružne prelaze .....	117

**SPISAK TABELA**

<u>Tabela 2.1.</u> Podaci o nesrećama na putnim prelazima u EU 2004-2015. i Srbiji 2007-2016. ....	26
<u>Tabela 4.1.</u> Evaluacija pristupa numeričkom rešavanju redova čekanja .....	69
<u>Tabela 5.1.</u> Raspodele učesnika i ishodi nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. u periodu 2007-2017.godine .....	87
<u>Tabela 5.2.</u> Pregled kritičnih putno-pružnih prelaza .....	89
<u>Tabela 5.3.</u> Raspodela saobraćajnih nezgoda na putnim prelazima u funkciji meseca u godini i časova u danu.....	90
<u>Tabela 5.4.</u> Srednji broj poginulih i povređenih na prelazima puteva različitog ranga .....	93
<u>Tabela 5.5.</u> Srednji broj povređenih i poginulih na putno-pružnim prelazima različitog nivoa osiguranja .....	94
<u>Tabela 6.1.</u> Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Buđanovci“ .....	109
<u>Tabela 6.2.</u> Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Platičevo“ .....	111
<u>Tabela 6.3.</u> Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Štitar“ .....	112
<u>Tabela 6.4.</u> Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Brasina“ .....	113
<u>Tabela 6.5.</u> Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Kraljevci“ .....	114
<u>Tabela 6.6.</u> Pregled nivoa pouzdanosti za posmatrane putno-pružne prelaze .....	115
<u>Tabela 6.7.</u> Pregled vrednosti rizika (r) za posmatrane putno-pružne prelaze .....	116
<u>Tabela 6.8.</u> Detaljan opis nesreća i nezgoda od 1996. do 2020.god. na putno-pružnom prelazu u km 3+285 pruge Ruma-Šabac- Rasputnica Donja Borina-drž.gr.- (Zvornik Novi) .....	119
<u>Tabela 6.9.</u> Pregled broja povređenih i usmrćenih lica na putno-pružnom prelazu „Buđanovci” od 1996. do 2020. godine .....	120
<u>Tabela 6.10.</u> Detaljna foto-dokumentacija putno-pružnog prelaza „Buđanovci” .....	120

# 1. UVODNA RAZMATRANJA

## 1.1. UVOD

Bezbednost saobraćaja predstavlja jedan od najvažnijih pokazatelja svakog vida saobraćaja i jedan je od osnovnih kriterijuma pri izboru načina prevoza kako ljudi, tako i robe. Pažnja koja se posvećuje bezbednosti saobraćaja, istovremeno predstavlja jedan od važnijih zadataka svakog društva. Istraživanja koja imaju za cilj podizanje nivoa bezbednosti, a ovo istraživanje je takvo, su uvek aktuelna i važna (Ercegovac, 2006). Pod bezbednošću u železničkom saobraćaju podrazumevaju se uslovi koje moraju ispunjavati železničke pruge, železnička vozila i postrojenja, objekti, uređaji i oprema koji se koriste u železničkom saobraćaju, železnički radnici i druga lica, kao i drugi uslovi koji su od značaja za ostvarivanje bezbednog, urednog i nesmetanog odvijanja železničkog saobraćaja.

Veliki je i značajan broj elemenata koji definišu i utiču na pojmove bezbednosti i sigurnosti, odnosno funkcionisanje železničkog saobraćaja tako da je veoma teško ove pojmove izraziti u bilo kojoj inženjerski merljivoj veličini ili nekom pokazatelju, koji bi bio potpuno jednoznačan i jasan. Jedan od pokazatelja bezbednosti u železničkom saobraćaju su pojava nesreća i nezgoda<sup>3</sup>.

Takođe, pod pojmom bezbednosti podrazumevaju se sve mere koje se preduzimaju kako bi se smanjio broj nesreća i nezgoda sa težnjom za postizanje apsolutne bezbednosti, a pod tim merama podrazumevamo :

- tehničke mere;
- organizacione mere.

Tehničke mere podrazumevaju primenu najsavremenije tehnike u železničkom saobraćaju, tehničku kontrolu rada izvršnog osoblja i informacionu podršku u praćenju odvijanja saobraćaja u realnom vremenu. U ovoj oblasti su istraživanja veoma skupa i kod nas se uglavnom ne primenjuju.

Organizacione mere podrazumevaju sve one mere koje se primenjuju u procesu odvijanja saobraćaja. Istraživanja u ovoj oblasti su jeftinija od istraživanja kod primene tehničkih mera, što im ne umanjuje značaj. Baziraju se na permanentnom praćenju saobraćajnog sistema kroz duži vremenski period, snimanjem stanja na terenu i uočavanjem grešaka koje se analizom i primenom novih mera nastoje eliminisati u budućnosti.

Ova disertacija se bavi bezbednošću saobraćaja na putno-pružnim prelazima i određivanju matematičkog modela sa ciljem smanjenja broja nesreća i nezgoda, baziranog na realnim pokazateljima broja nesreća i nezgoda.

Korišćena je baza podataka o nesrećama i nezgodama na teritoriji Akcionarskog društva za upravljanje javnom železničkom infrastrukturom „Infrastruktura železnice Srbije“ u periodu od 2007. do 2017. godine (preko 4000 nesreća i nezgoda) na preko 20 pruga koje su u eksploataciji, sa posebnom analizom uzorka nesreća i nezgoda na 2128 putno-pružnih prelaza.

---

<sup>3</sup> U Zakonu o bezbednosti u železničkom saobraćaju (Službeni glasnik RS broj 41 od 31.05.2018. godine) izvršena je supstitucija prethodnog termina „vanredni događaj” sa pojmom „nesreća i nezgoda”

Analiza nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima vršena je samo u odnosu na putno-pružne prelake koji su pod nadležnošću javne železničke uprave. Nisu korišćeni podaci za turističko-muzejsku železnicu, kao deo javne železničke infrastrukture, kao ni podaci i pregled putno-pružnih prelaza industrijske železnice i industrijskih koloseka, kod kojih je Aktom o industrijskim kolosecima i posebnim ugovorima regulisano priključenje industrijskog koloseka na javnu železničku infrastrukturu.

Korišćeni su zvanični i dostupni podaci o prosečnom dnevnom godišnjem saobraćaju (PDGS) na državnim putevima prvog i drugog reda (izvor podataka JP „Putevi Srbije“), brojanje saobraćaja i realizovani red vožnje (izvor „Infrastruktura železnice Srbije“ a.d. – stvarni grafikoni saobraćaja vozova). Takođe, korišćene su metode arhivskog prikupljanja podataka o broju i vrsti nesreća i nezgoda (uzorak od preko 600 nesreća i nezgoda) na kompletnoj mreži pruga Akcionarskog društva za upravljanje javnom železničkom infrastrukturom „Infrastruktura železnice Srbije” u periodu od 2007. do 2017. godine, sa analizom nesreća i nezgoda na 2128 putno-pružnih prelaza. Metodom komparacije sa realnim nezgodama i nesrećama moguće je odrediti nivo rizika za svaki posmatrani putno-pružni prelaz, pojedinačno.

## 1.2. OBRAZLOŽENJE TEME, PREDMETA I OKVIRA ISTRAŽIVANJA

Utvrđivanje parametara bezbednosti u železničkim upravama je u pravilu determinisano propisima službe i resornih ministarstava (u konkretnom slučaju ministarstava oblasti Saobraćaja, Pravde i Unutrašnjih poslova, Direkcije za železnicu, itd.). Detaljni izveštaji su standardizovani, a izmene u protokolima analiza se ne mogu menjati u kratkom vremenskom periodu. Specifični prilazi kojima se može značajno unaprediti analiza bezbednosti, nije omogućena postojećim protokolima osoblju stručnih službi koje se bave bezbednošću železničkog saobraćaja. U tom smislu i iskorak koji je u našim uslovima izveden za potrebe „Agencije za bezbednost drumskog saobraćaja“, a odnosi se na identifikaciju rizičnih mesta na putevima Republike Srbije, nema analogiju za mrežu pruga „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. (oko 3700 km pruga, 2128 putno-pružnih prelaza u javnom saobraćaju, bez muzejsko-turističke železnice) i za unutrašnje plovne puteve (preko 1000 km).

Bezbedan prelaz puta preko železničke pruge, zavisi od velikog broja faktora. Društveni troškovi nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima u železničkom saobraćaju su veoma visoki i dovode do smanjenja nivoa bezbednosti železničkog saobraćaja, iako je većina nesreća izazvana od strane učesnika u drumskom saobraćaju. Pored posledica koje se ogledaju u gubicima ljudskih života, povredama i invaliditetu, nesreće i nezgode na putno-pružnim prelazima izazivaju značajna primarna i sekundarna kašnjenja u železničkom saobraćaju, stres i traume direktnih učesnika u izvršenju saobraćaja i ogromne imovinske i ekonomske gubitke.

Konfliktni tokovi su uvek potencijal za nastanak nesreće i nezgode. Oni su uzrokovani nedostatkom tehničkih kapaciteta i nepoštovanju principa raspodele prioriteta. Nepostojanje principa raspodele prioriteta u konfliktnim tokovima dovodi do nesreće i nezgode, a nepoštovanje ovog principa dovodi do haosa.

Ova doktorska disertacija bazirana je na heterogenom konceptu konflikta dva vida saobraćajnih sistema, odnosno, bavi se proučavanjem bezbednosti saobraćaja na putno-pružnim prelazima i



određivanju matematičkog modela sa ciljem proračuna maksimalnog rizika i određivanja pouzdanosti putno-pružnih prelaza. Svaki taj saobraćajni sistem ima nivo bezbednosti koji se proračunava na osnovu statističko istorijske analize (podataka o nesrećama i nezgodama).

Konfliktni saobraćajni tokovi imaju stohastičku strukturu i zbog toga, nepoštovanje prioriteta, ne mora obavezno da izazove nezgodu ili nesreću. Sa povećanjem gustine tokova dolazi do povećanja rizika od pojave nesreće ili nezgode u konfliktnim tokovima.

U definisanom inženjerskom okviru, od determinističke do stohastičke granice apstraktnog broja nesreća i nezgoda, nalazi se proporcija za estimaciju i komparaciju rizika od nastanka nezgoda i nesreća na putno-pružnim prelazima. Proračun ove proporcije je zasnovan na realnim događajima i moguće je utvrđivanje nivoa bezbednosti za svaki putni prelaz pojedinačno, što predstavlja novi pristup u proceni i oceni bezbednosti saobraćaja na putno-pružnim prelazima i osnovni originalni doprinos u istraživanjima bezbednosti na mestima ukrštaja železničkog i drumskog saobraćaja.

Osnovni motiv izbora teme predmetne disertacije je određivanje nivoa rizika od pojave nesreća i nezgoda, sa posebnim akcentom na rizične putno-pružne prelaze, na prugama Akcionarskog društva za upravljanje javnom železničkom infrastrukturom „Infrastruktura železnice Srbije” primenom savremenih naučnih metoda u skladu sa dostignućima modernih železničkih uprava i njihovih istraživačkih centara. Pojam „rizik” označava stopu učestalosti nesreća i nezgoda sa štetnim ishodom (nastalih usled opasnih situacija) i stepen ozbiljnosti te štete.

### 1.3. CILJ ISTRAŽIVANJA

Iako Akcionarsko društvo za upravljanje javnom železničkom infrastrukturom „Infrastruktura železnice Srbije” uredno, u skladu sa Zakonom o bezbednosti u železničkom saobraćaju („Službeni glasnik RS”, broj 41 od 31. maja 2018. godine) i delimično u skladu sa evropskim normama, vodi sveobuhvatne evidencije o nesrećama i nezgodama (supstituisan prethodni termin „vanredni događaji”), postojeći protokoli i način izražavanja dobijenih rezultata imaju dominantno prezentacioni karakter, sa izraženim odsustvom analitičkog pristupa. Ovde se misli, pre svega, na deo sinteze rezultata koji bi u kvalitativnom i kvantitativnom smislu omogućili predikciju nesreća i nezgoda, a sve u cilju predupređenja mera na njihovom smanjenju, kao i identifikovanju rizičnih slučajeva, mesta, kao i problematičnih putno-pružnih prelaza u smislu pojave nesreća i nezgoda na mreži pruga „Infrastruktura železnice Srbije” a.d.

Posebno nedostaje sveobuhvatni analitički prilaz, koji bi na jednostavan i efikasan način usmeravao stručne službe na sanaciju problematičnih mesta ukrštaja drumskog i železničkog saobraćaja.

Zbog toga je osnovna motivacija, izbora teme predmetne disertacije, upravo sintetička rezultanta bezbednosti železničkog saobraćaja, u cilju pomoći nadležnom ministarstvu, upravljajuću javne železničke infrastrukture i svim ostalim telima koja se bave bezbednošću železničkog saobraćaja, na smanjenju broja nesreća i nezgoda, pogotovu na mestu ukrštaja drumskog i železničkog saobraćaja. Shodno Direktivi evropskog parlamenta i saveta (2004/49 EZ) od 29.04.2004. godine, gde je u čl. 4 propisano da su železnička preduzeća (Railway Companies) i Upravljači infrastrukture (Infrastructure Manager) odgovorni za bezbedno funkcionisanje železnice, a u cilju dobijanja sertifikata o bezbednosti, železnička

preduzeća i Upravljači infrastrukture su osnovali svoj Sistem za upravljanje bezbednošću (SMS-Safety Management System) i izbor teme disertacije predstavlja pomoć kako upravljaču javne železničke infrastrukture, tako i upravljaču javnih puteva u eliminaciji rizika od pojave nesreća i nezgoda, sa posebnom analizom bezbednosti na putno-pružnim prelazima.

Ova analiza je osnova za metodu u određivanju stohastičke inženjerske granice apstraktnog broja nesreća i nezgoda. Osnovna metoda će biti „queueing theory“, odnosno primena teorije masovnog opsluživanja (TMO). U datom modelu koristiće se konvencionalna notacija u TMO, Kendalova notacija (Kendall, 1953), odnosno Kendal-Lijeva notacija, kako se to po nekim izvorima navodi (Heragu i dr., 1997) s obzirom da je Lee izvršio određene modifikacije u notaciji (Lee, 1966).

Ovo je model servisnog sistema i u posmatranom slučaju putno-pružnog prelaza, kod kog je tok dolazaka drumskih i železničkih vozila Poissonov, obrada korisnika, odnosno posluživanje sistema jednog putno-pružnog prelaza ima eksponencijalnu raspodelu, a kapacitet „čekaonice“ je beskonačan (model M/M/1). Model je baziran na teorijskom razmatranju neprekidnog kretanja drumskih i železničkih vozila u sistemu opsluživanja putno-pružnog prelaza. Analiza dobijenih rezultata će biti izvršena primenom standardnih statističkih metoda (parametarske i neparametarske).

#### 1.4. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA

U definisanom inženjerskom okviru, od idealnog minimalnog determinističkog broja nezgoda i nesreća na putnim prelazima, do stohastičkog sa maksimalnom entropijom, nalazi se broj realizovanih nezgoda i nesreća na putnim prelazima. Raspoloživi statistički skup sa svim neophodnim parametrima je već naveden.

Iz vladajućih stavova u oblasti bezbednosti železničkog saobraćaja, obrazloženja predmeta, potreba i cilja istraživanja, ustanovljena je osnovna hipoteza rada:

**Hipoteza:** U definisanom inženjerskom okviru, od determinističke do stohastičke granice događaja se nalazi proporcija za estimaciju (procenu) i komparaciju rizika od nastanka nezgoda i nesreća na putno-pružnim prelazima. Proračun ove proporcije je zasnovan na realnim događajima i biće moguće utvrđivanje nivoa rizika za svaki putno-pružni prelaz pojedinačno.

#### 1.5. PREGLED VLADAJUĆIH STAVOVA U LITERATURI

Pored prepoznatljivog socijalnog i organizacionog značaja, nesreće i nezgode na železnici imaju i veliki ekonomski značaj (Evans, 2013). Međutim po pristupnoj literaturi, može se nedvosmisleno ustanoviti da je bezbednost železničkog saobraćaja visoko stručna oblast, ali sa manjim učešćem u naučno istraživačkom pristupu. Postoje radovi koji sa naučnog aspekta obrađuju problematiku bezbednosti železničkog saobraćaja u delu istražnog postupka (Evans i Verlander, 1996; Cedergren, 2013; Cedergren i Petersen, 2011), uticaja ljudskog faktora (Baysari i dr., 2008; Edkins i Pollock, 1997) kao i istraživanja bezbednosti na putnim prelazima (Teya i dr., 2011; Clark i dr., 2013; Ćirović i Pamučar, 2013; Perrone i Isler, 2103; Evans, 2011). Upravo navedena dominacija ide u prilog neuporedivo većeg obima istraživanja bezbednosti sa akcentom na drumski saobraćaj, zbog koje u ovoj

specijalizovanoj oblasti postoje visoko rangirani časopisi, što nije slučaj u oblasti istraživanja bezbednosti na putno-pružnim prelazima analizirajući železnički saobraćaj. Takođe, postoje izuzetne sintetičke studije bezbednosti u modernim železničkim upravama (Andersson i dr. 2006; Wei i dr., 2012; Silla i Kallberg, 2012; Evans, 2007; Evans, 2011, Baysari i McIntosh, 2008). Kako na svetskom nivou, tako i u Republici Srbiji postoji identična favorizacija istraživanja bezbednosti u drumskom saobraćaju (Lipovac i Jovanovic, 2008). Ovaj deficitarni trend je neophodno prekinuti, posebno u odnosu na aktuelne procese restruktuiranja (Bošković i Bugarinović, 2015).

U železničkim nesrećama život izgubi više dece, nego pri slučajnom trovanju ili strujnom udaru (Nixon i dr., 1984). Polovina nesreća je prouzrokovana pojavom tehničkih neispravnosti delova železničkih sistema, tj. kvalitetom održavanja, a ostalo je većinom posledica ličnih propusta zaposlenih koji rade u operativi ili održavanju (Baysari i dr., 2008; Reason 1990,1997). Ovde se pod ličnim propustima misli na propuste koji su direkto vezani za nastanak nesreće/nezgode. U radu koji se bavi učešćem ljudskog faktora u železničkim nesrećama i nezgodama u Australiji (Baysari i dr., 2008), definišu se dve kategorije grešaka koje se dele na aktivne i latentne. Kod aktivnih se efekti osećaju odmah i povezani su sa neposrednim izvršenjem saobraćaja, dok se za latentne greške posledice mogu osetiti tek nakon određenog vremena u kombinaciji sa drugim faktorima koji pospešuju pojavu nesreća i nezgoda. U kasnijoj verziji ovaj model je nazvan „Model švajcarskog sira” (Reason i dr., 2006) gde takozvana trajektorija nesreća i nezgoda prolazi kroz „rupe” koje predstavljaju određene slabosti i greške prilikom regulisanja saobraćaja u sistemu, tehničke i organizacione greške, greške rukovodilaca itd. u sukcesivnim nivoima koje dovode do pojave nesreća i nezgoda.

U Sjedinjenim Američkim Državama godišnje se preveze preko dva miliona železničkih kola tovarnih opasnim materijama i postoje istraživanja u ovom segmentu bezbednosti na železnici. Poznat je optimizacioni model - Pareto optimizacione tehnike, koji uzima u obzir dve vrste smanjenja rizika kod prevoženja opasnih roba železnicom i to: prevenciju od pojave nesreća i nezgoda i unapređenje bezbednosti i dizajna sudova-cisterni za prevoz opasnih roba, u cilju postizanja najnižeg rizika. Iako se model bazira na američkim podacima, metodologija može da se prilagodi železničkim sistemima u drugim regionima (Xiang Liu, 2013). Razvojem urbanizacije posvećuje se pažnja i samoj bezbednosti na javnim mestima, a posebno na železničkim stanicama koje predstavljaju složene sistemime i mesta gde su najveća okupljanja, gužve i gde se vrši prevoz zapaljivih, eksplozivnih i opasnih materija (Wei i dr., 2012).

Primetno je povećanje broja radova na istraživanju bezbednosti na putno-pružnim prelazima (Clark i dr., 2013; Perrone i Isler, 2013). Zbog pojave veće smrtnosti dece u nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima, rađena su istraživanja u ovoj oblasti na Novom Zelandu koja su obuhvatila dizajn, implementaciju i evaluaciju niza intervencija, uključujući sveopštu komunikaciju i edukaciju na podizanju svesti o nezakonitim i rizičnim ponašanjima pešaka u zoni putno-pružnih prelaza (nepropisna prelaženja pruge) postavljanjem upozoravajućih bilborda i postera, edukaciju omladine kroz nastavne programe u školama, postavljanje ograda i usmeravanje pešaka na propisna mesta prelaska pruge kao i permanentno kažnjavanje na licu mesta takvog ponašanja (Lobb i dr., 2003).

Za period od 1946. godine do 2009. godine, vršeno je istraživanje stope smrtnosti pešaka i učesnika u drumskom saobraćaju kod tri vrste osiguranja na preko 1000 putno-pružnih prelaza u Velikoj

Britaniji (Evans, 2011). Ustanovljeno je da je najveći broj nesreća sa smrtnim ishodom bilo na aktivnim putno-pružnim prelazima oko 52 %, na pasivnim putno-pružnim prelazima oko 43 % i na prelazima kontrolisanim od strane železnice samo 5% . To nije iznenađujuće, s obzirom da većina nesreća koja se dogodi na aktivnim ili pasivnim putno-pružnim prelazima, je zbog primarne odgovornosti učesnika u drumskom saobraćaju.

Metodologija prikupljanja podataka o brzini reagovanja učesnika u drumskom saobraćaju na uređaje upozorenja na putno-pružnim prelazima u Australiji vršena je pomoću dva pristupa i to: direktno na terenu sa video snimcima odabranih lokacija i u laboratoriji putem „driving simulation” (Teya i dr., 2011) i doprinela je poboljšanju bezbednosti na putno-pružnim prelazima u smislu mogućnosti procene ponašanja vozača prema inovativnim uređajima upozorenja na putno-pružnim prelazima.

Postoje slična istraživanja bezbednosti na putno-pružnim prelazima i kod nas (Ćirović i Pamučar, 2013) gde je korišćenjem Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) modela koji je obučavan (treniran) sa iskustvenim znanjem 20 stručnjaka iz oblasti bezbednosti drumskog saobraćaja i koji je izvršio izbor železničkih putno-pružnih prelaza na području Beograda kod kojih je potrebno investirati u opremu za podizanje stepena osiguranja putno-pružnih prelaza. ANFIS model je testiran na 88 putno-pružnih prelaza i napravljeno je poređenje između proizvedenih (dobijenih) podataka i podataka na osnovu predviđanja stručnjaka. Utvrđeno je osam kriterijuma koji utiču na izbor železničkih putno-pružnih prelaza za instaliranje opreme potrebne za povećanje bezbednosti saobraćaja na tom prelazu gde Ćirović i Pamučar (2013) u svom istraživanju dolaze do zaključka da: „Najčešći izbor, koje od putno-pružnih prelaza treba obezbediti aktivnom zaštitom (zvonovno i signalnim-treptačima), zasniva se na proceni medija i pritisku društva, kao i zbog mogućih posledica od porasta broja nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima”.

Tokom poslednjih nekoliko decenija, železnice u mnogim zemljama su privatizovane i restrukturirane u cilju poboljšanja njihovog ekonomskog učinka. Takve promene mogu potencijalno da utiču na bezbednost. Postoje radovi koji razmatraju dokaze o efektima na bezbednost prilikom restrukturiranja železnica Velike Britanije, Japana i Sjedinjenih Američkih Država (Evans, 2010, 2013). Nema dokaza da su te promene dovele do toga da je bezbednost pogoršana, naprotiv, istraživanja za SAD su pokazala da je restrukturiranje na železnicama u SAD dalo veću slobodu u određivanju cene prevoza i mogućnosti da se ostvari zdravija finansijska struktura, što opet, omogućava ulaganja u podizanje stepena osiguranja kao i samo povećanje bezbednosti saobraćaja (Evans, 2013).

Železnice Republike Srbije su u fazi restrukturiranja i liberalizacije železničkog tržišta čiji model se dosta razlikuje od onog u zemljama regiona Jugoistočne Evrope i ostalih evropskih zemalja kod kojih je prva faza razvoja tržišta već pokazala da pitanja bezbednosti predstavljaju važnu prepreku na razvoj tržišta (Bošković i Bugarinović, 2015). Prema direktivi o bezbednosti železničkog saobraćaja Evropske unije (Direktiva 2004/49/EC od 29.04.2004. godine) svaka država članica treba da uspostavi stalno i nezavisno telo za istrage, odnosno odbor za istrage nesreća, sa zadatkom da istražuje ozbiljne železničke nesreće i nezgode. Cedergren (2013) u radu koji se bavi implementacijom bezbednosnih preporuka tela za istrage u Švedskoj kao važan zadatak ovog tela, pored utvrđivanja uzroka kako i zašto je došlo do pojave nesreće i nezgode, navodi davanje preporuka za izbegavanje istih i sličnih događaja u budućnosti. Identifikujući „uzroke” očigledna je primena mera koje deluju na povećanje bezbednosti na mikro i

makro nivou. [Lundberg i dr. \(2010\)](#) i [Kerol i Fahlbruch \(2011\)](#) bavili su se istraživanjima vezanim za metode koje se primenjuju u istragama nesreća i nezgoda sa fokusom na primeni preporuka, navodi [Cedergren \(2013\)](#) i taj proces zaslužuje dalju pažnju. Međutim, ova tranzicija od analize do bezbednosne preporuke, odnosno od razmatranja nesreća i nezgoda koje su se desile, do budućih mera i implementiranja istih, nije uvek jasna.

Ovaj jednostavan proces baziran na odnosu uzroka i posledice, je ograničen u smislu objašnjenja nesreća i nezgoda koje se dešavaju u modernim društveno-tehničkim sistemima koje karakteriše visok stepen složenosti i kako to [Perrow \(1984\)](#) u radu [Cedergren \(2013\)](#) tvrdi: „Sistemi koji se sastoje od velikog broja delova koji su usko vezani i komuniciraju na nelinearan način, su sposobni da proizvedu nepoznate i neočekivane događaje. Nesreće u složenim sistemima su zbog toga neizbežne, što je poruka iza koncepta tzv. normalne nesreće”. Prema istom mišljenju [Leveson \(2011\)](#) u istom radu kaže da su nesreće u složenim sistemima često rezultat interakcije komponenti koje besprekorno funkcionišu. Sama aktivnost tela za istrage na utvrđivanju uzroka nesreća i nezgoda, predstavlja prvi korak u cilju postizanja poboljšanja bezbednosti saobraćaja. Sledeći korak je implementacija i korektivno sprovođenje bezbednosnih preporuka ([Cedergren, 2013](#)). Drugi segment na kojem se bazira rad [Cedergren \(2013\)](#) je interakcija između različitih aktera uključenih u upravljanje rizicima, koje podrazumeva rizike kod procene i donošenja odluka pravnih, institucionalnih i političkih mehanizama.

Bezbednost na putno-pružnim prelazima je jedno od najkritičnijih pitanja koje treba rešiti na železnici ([Ghazel, 2009](#); [Mekki i dr., 2012](#); [Liu i dr., 2016](#)). U 28 zemalja Evropske unije (EU) u 2012. godini bilo je više od 118.000 putno-pružnih prelaza što odgovara proseku od pet prelaza na 10 km pruge ([ERA- European Railway Agency, 2014](#)). Nesreće na putno-pružnim prelazima u Evropi rezultiraju sa više od 300 smrtnih slučajeva svake godine ([Liu i dr., 2016](#)), a u nekim evropskim zemljama, nesreće na putno-pružnim prelazima čine oko 50% od svih železničkih nesreća ([Ghazel i El-Koursi, 2014](#); [Evans, 2011b](#)).

U Francuskoj, na 30.000 km železničke mreže nalazi se 18.000 putno-pružnih prelaza, preko kojih svakodnevno prelazi, u proseku 16 miliona vozila, ([SNCF Reseau, 2011](#)). Bez obzira na preduzete mere za poboljšanje bezbednosti na putno-pružnim prelazima od strane [SNCF Reseau](#)-Francuski nacionalni upravljač infrastrukture, evidentirano je 100 nesreća na putno-pružnim prelazima u kojima je život izgubilo 25 lica u 2014. godini. Iako je ovaj broj smanjen, u odnosu na period od pre deset godina, teži se njegovom i daljem smanjenju ([SNCF Reseau, 2015](#)).

Američka federalna uprava za železnicu ([U.S. Department of Transportation's-USDOT](#)) 2012. godine obavila je istraživanje u North Carolina „Sealed Corridor” u cilju poboljšanja i konsolidacije svih javnih i privatnih prelaza između gradova Charlotte i Raleigh. Korišćena je modifikovana APF formula (Accident Prediction Formula) koja razmatra samo verovatnoću nesreća sa smrtnim slučajem. Analizirajući stope smrtnosti u periodu od 1990. do 2008. godine na 44 prelaza na kojima je izvršeno podizanje nivoa obezbeđenja, za period pre i posle primenjenih mera, došlo se do procene da je spašen 1,5 život u odnosu na posmatran broj putno-pružnih prelaza, kao rezultat ovih poboljšanja nivoa obezbeđenja putno-pružnih prelaza. Ova metoda je procenila da su poboljšanja koja su provedena do septembra 2008. godine, smanjila broj smrtnih slučajeva za oko 0,39 godišnje. Okvir za sistemsku analizu ([Leveson, 2011](#); [Read i dr., 2016](#); [Wilson, 2014](#)) i teorije psihološke šeme ([Salmon i dr., 2013](#);

[Stanton i Walker, 2011](#)) korišćeni su za analizu faktora koji doprinose i u osnovi su pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. Temeljno je analizirana veza između nesreće i geometrije puta uz korišćenje funkcije bezbednosti i opisa koliko su sigurnosne performanse putnih objekata povezane sa različitim karakteristikama puta.

Mnogi postojeći radovi koji se bave bezbednošću putno-pružnih prelaza su posvećeni razvoju kvalitativnih pristupa kao što su ankete ([Vigglesworth, 2001](#)), intervjui ([Read i dr., 2016](#)), metode fokusnih grupa ([Stefanova i dr., 2015](#)) ili simulatora vožnje ([Larue i dr., 2015](#)), radije, nego prikupljanjem realnih podataka o broju i tipu nesreća u ovoj oblasti.

Poznata tehnika matematičkog programiranja za merenje efikasnosti kompleksnih entiteta sa raznorodnim ulazima/izlazima, Analiza obavijanja podataka (Data Envelopment Analysis – DEA), korišćena je u analizi efikasnost 12 operativnih jedinica koje predstavljaju najbliže gradove u kojima su desile nesreće na putnim prelazima u Republici Srbiji u periodu od 2005. do 2014. godine, sa ciljem smanjenja broja nesreća ([Grujić i dr., 2018](#)).

U Severnoj Karolini (SAD) rađena su istraživanja bazirana na modelu predviđanja rizika od pojave sudara na putnim prelazima u odnosu na klasu pruge i koloseka ([Soumya Sharma i dr., 2019](#)).

U Republici Srbiji rađeno je istraživanje ([Kasalica i dr., 2020](#)) sa ciljem da se izdvoje potrebni parametri koji kvantifikuju rizik povezan sa železničkim prelazima, gde su analizirani dostupni statistički modeli koji se obično koriste (Poisson, NB, ZIP i ZINB) i uvedena je nova mera za rizik - empirijski rizik.

Konkurentski model rizika ([Keramati, i dr., 2020](#)) je posebna vrsta analize preživljavanja, dizajnirana da pravilno proceni marginalnu verovatnoću ishoda incidencije kada je moguće više uzroka neuspeha.

Da bi se značajno smanjile nesreće i njihove posledice na putno-pružnim prelazima jako je važno uspostaviti visoko kvalitetan model predviđanja nesreća i nezgoda na mestima ukrštaja železničkog i drumskog saobraćaja i sprovesti detaljnu i temeljnu analizu u smislu razumevanja potencijalnih razloga za nesreće i nezgode koje se dešavaju na mestima ukrštaja ova dva vida saobraćaja.

Zbog svega navedenog postoji jaka potreba za odgovarajućim modelom za procenu i komparaciju stepena rizika od nastanka nesreća i nezgoda, koji doprinosi poboljšanju bezbednosti putno-pružnih prelaza. Takav model treba da ima dobar statistički kvalitet

## 1.6. NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA

Cilj ovog istraživanja je usmeren na analizu bezbednosti železničkog saobraćaja, sa osvrtom na stanje bezbednosti na području 2128 putno-pružnih prelaza koji su različito obezbeđeni na mreži pruga u Republici Srbiji (RS), u periodu od 2007. do 2017. godine, u smislu određivanja stepena rizika od nastanka nesreće ili nezgode.

Rezultati ovog istraživanja omogućiće funkcionalnu klasifikaciju određenog broja putno-pružnih prelaza na železničkoj mreži u Republici Srbiji u odnosu na faktor bezbednosti saobraćaja, a shodno planiranim velikim infrastrukturnim projektima u uslovima reorganizacije preduzeća „Infrastruktura železnice Srbije“ a.d.

Ovo istraživanje je usmereno kao pomoć upravljaču javne železničke i putne infrastrukture u smislu identifikacije i poboljšanja nivoa osiguranja rizičnih mesta (posebna analiza putno-pružnih prelaza) na železničkoj mreži pruga RS, uz primenu naučnih metoda, a u odnosu na načine funkcionisanja železničkih signalno-sigurnosnih uređaja, ponašanja železničkog izvršnog osoblja, kao i ponašanja samih učesnika u drumskom saobraćaju.

Kao naučni doprinos istraživanja u ovoj disertaciji, očekuje se podizanje nivoa obezbeđenja putno-pružnih prelaza i određivanja posebnih mera bezbednosti na prelazima, za koje, uz pomoć dobijenog modela, odredimo da nose veći nivo rizika od pojave nesreća i nezgoda, u odnosu na ostale putno-pružne prelaze.

Utvrđivanje modela za procenu i komparaciju rizika od nastanka nesreća i nezgoda, predstavlja originalan i sasvim novi pristup u analizi bezbednosti saobraćaja na putno-pružnim prelazima. Na ovaj način doprinosi se, ne samo smanjenju pojave nesreća i nezgoda, nego i očuvanju ljudskih života, što predstavlja značajan doprinos nauci, nemerljiv opštepoznatim veličinama.

## 1.7. STRUKTURA DOKTORSKE DISERTACIJE

U ovom radu akcenat je stavljen na proučavanje bezbednosti saobraćaja na mestima sučeljavanja dva vida saobraćaja (železničkog i drumskog) i predlog mera podizanja nivoa bezbednosti u području putno-pružnih prelaza. Predložen je nov model za procenu i komparaciju rizika od pojave nesreća i nezgoda na ovim mestima, zasnovan na naučnim i matematičkim teorijskim osnovama. Rad se sastoji od osam celina, gde je u svakoj celini diskutovano kroz sam tekst ili napomenama u fusnotama, u većem ili manjem obimu, u zavisnosti od izložene materije, a sve radi boljeg razumevanja samog koncepta postupanja, od ideje do realizacije. Na kraju svake oblasti dat je pregled korišćene literature.

➤ U 1. delu rada koji se sastoji od uvodnih razmatranja, opisan je značaj oblasti bezbednosti saobraćaja, kojoj tema rada pripada. Izvršeno je obrazloženje teme, okvira i predmeta istraživanja, uz opis i navod ciljeva istraživanja i postavljena je hipoteza rada. Kroz pregled vladajućih stavova u literaturi, od bezbednosti saobraćaja u uopštenom smislu, sve do bezbednosti saobraćaja na putno-pružnim prelazima, navedeni su opšti i stavovi za užu oblast koja se odnosi na problematiku putno-pružnih prelaza uz naglašavanje očekivanog naučnog doprinosa, odabrane teme istraživanja.

➤ U 2. delu rada opisane su osnovne karakteristike i pojmovi u vezi putno-pružnih prelaza, sa pravno-normativnim okvirima koji regulišu oblast upravljanja saobraćajem na ovim opasnim mestima. Dat je pregled saobraćajnih znakova, koji učesnike u drumskom i železničkom saobraćaju obaveštavaju i upozoravaju o nailasku na putno-pružni prelaz, vrsti obezbeđenja saobraćaja na putnom prelazu i udaljenosti od putno-pružnog prelaza. Izvršena su kratka poređenja bezbednosti saobraćaja na putno-pružnim prelazima kod nas i u svetu i opisan način osnovnog obezbeđenja putno-pružnih prelaza. Kroz studiju „Istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama pružnih prelaza” urađenu od strane Agencije za bezbednost saobraćaja RS, 2018. godine, u saradnji sa većim brojem eksperata za ovu oblast, predložene su kvalitetne i sveobuhvatne mere za podizanje bezbednosti saobraćaja na ovim mestima i u većem delu studije iscrpljeno je polje istraživanja na način primenjen u navedenoj studiji. Iz ogromnog operativnog iskustva i rada u praćenju, organizovanju, planiranju i nadzoru nad regulisanjem

saobraćaja, a samim tim na vođenju brige o bezbednosti saobraćaja, od strane autora ove doktorske disertacije, u najkraćem pregledu data su još neka zapažanja, u smislu eventualnih poboljšanja i o čemu posebno da se vodi računa, a sve u cilju izbegavanja pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. Zbog napred navedenih razloga, nastala je ideja da se dalje nastavi na teorijskom, naučnom i na zakonima matematike zasnovanom istraživanju u ovoj oblasti, sa željom da se makar i najmanjim doprinosom ovog rada, poboljša i podigne nivo bezbednosti odvijanja saobraćaja na putno-pružnim prelazima, a ovaj rad analitički i kritički razmatra i posluži kao osnova za buduća istraživanja.

➤ U 3. delu rada dat je pregled literature koja se odnosi na veći broj modela za predviđanje nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. Pored opšteg pregleda, sa opisom korišćenih modela u određenom broju zemalja, njihovih prednosti, nedostataka, (ne) mogućnosti primene i u drugim zemljama, a ne samo u zemljama gde su istraženi i predloženi. Kroz diskusiju i zaključke, izvršena je polarizacija nedostataka i prednosti. Izučavanje i istraživanje svega što je urađeno u ovoj oblasti, a što je bilo dostupno, uticalo je na izbor i korišćenje matematičkog aparata u ovom radu, koji nije dovoljno razmatran i istražen.

➤ U 4. delu rada opisane su teorijske osnove sistema masovnog opsluživanja, gde su u najkraćem mogućem obimu obuhvaćene definicije, teoreme, dokazi, formule i sve ono što je poslužilo za izradu originalnog modela za procenu rizika od pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. Navedena oblast istraživanja je nedovoljno korišćena, dosta zahtevna za iznalaženje analitičkih rešenja, a samim tim i neopravdano zapostavljena, što je još jedan od razloga odabira alata TMO u ovom istraživanju i vraćanja „queueing theory“ na pijedestal koji i zaslužuje.

➤ U 5. delu rada opisan je izvor podataka, navedene korišćene baze podataka, uz statističku obradu posmatranog uzorka, radi lakšeg tumačenja i obrazloženja koja mogu, a ne moraju da budu u korelaciji sa dobijenim rezultatima primenjenog modela.

➤ U 6. delu rada, nakon opisnog teorijskog dela za primenjene principe maksimalnog rizika, entropije i haosa, detaljno je opisan novi model, sa svim parametrima, ulaznim podacima, izračunavanjem verovatnoća, prvenstveno „ $p_{\text{theor}}$ “ koja za naš rad predstavlja verovatnoću stanja teorijskih nesreća i nezgoda. „ $P_{\text{theor}}$ “ je jednaka verovatnoći istovremene zauzetosti putno-pružnog prelaza sa vozilima železničkog i drumskog saobraćaja. Takođe u ovom delu rada model je primenjen na određenom broju putno-pružnih prelaza gde su prikazani i diskutovani dobijeni rezultati.

➤ U 7. završnom delu rada, na osnovu sprovedenih svih istraživačkih faza, dati su opšti zaključci i pravci daljih istraživanja.

➤ U 8. odeljku dat je spisak korišćene literature.

## 1.8. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE)

- Andersson J. et al. (2006). Roadside Infrastructure for Safer European Roads, European best practice for roadside design: guidelines for maintenance and operations of roadside infrastructure, Chalmers University of Technology; <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/2204>
- Baysari M. T.; McIntosh A. S.; Wilson J. R. (2008). Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia, Accident Analysis and Prevention Volume 40,



- Issue 5, September 2008, Pages 1750-17; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.06.013>
- Bošković B., Bugarinović M. (2015). Why and how to manage the process of liberalization of a regional railway market: South-Eastern European case study, *Transport Policy* Volume: 41 50-59 Publisher: Elsevier; <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.03.009>
- Carroll J.S., Fahlbruch B. (2011). „The gift of failure: new approaches to analyzing and learning from events and near-misses.” Honoring the contributions of Bernhard Wilpert, *Safety Science* 49 (1), 1–4; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.03.005>
- Cedergren A., Petersen K. (2011). Prerequisites for learning from accident investigations– a cross-country comparison of national accident investigation boards. *Safety Science* 49 (8/9), 1238–1245; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.04.005>
- Cedergren A. (2013). Implementing recommendations from accident investigations: A case study of inter-organisational challenges, *Accident Analysis and Prevention* 53 (2013) 133– 141; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.01.010>
- Clark H. E.; Perrone J. A.; Isler R. B. (2013). An illusory size–speed bias and railway crossing collisions, *Accident Analysis and Prevention* 55 226–231; <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2013.02.037>
- Direktiva 2004/49/EZ Evropskog Parlamenta o bezbednosti na železnici i njenim implementacionim aktima, *Službeni list broj L 220/16*, 21.6.2004.
- Directive 2004/49/EC of the European Parliament and of the Council Of 29 April 2004 on safety on the Community’s railways and amending Council Directive 95/18/EC on the licensing of railway undertakings and Directive 2001/14/EC on the allocation of railway infrastructure capacity and the levying of charges for the use of railway infrastructure and safety certification (Railway Safety Directive) OJ L 220/16, 21.6.2004. godine; <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/49/oj>
- Edkins G. D., Pollock C. M. (1997). The influence of sustained attention on Railway accidents, *Accident Analysis and Prevention*, 29 (4), 533-539; [http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575\(97\)00033-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575(97)00033-X)
- Ercegovac Pamela (2006). Magistarski rad „Istraživanje uticaja nekih karakteristika železničkog izvršnog osoblja na nastanak vanrednih događaja”, *Sobraćajni fakultet Beograd*, 27.09.2006. godine;
- European Railway Agency (ERA), 2014. Intermediate report on the development of railway safety in the European Union, European Railway Agency, Safety Unit; [www.era.europa.eu](http://www.era.europa.eu)
- Evans A. W.; Verlander N. Q. (1996). Estimating the consequences of accidents: The case of automatic train protection in Britain, *Accid. Anal. Prev.* Vol. 28, No. 2, 181-191, 1996. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(95\)00057-7](https://doi.org/10.1016/0001-4575(95)00057-7)
- Evans A. W. (2007). Rail safety and rail privatisation in Britain, *Accident Analysis and Prevention* 39(3): pp 510–523; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.09.007>
- Evans A.W. (2010). Rail safety and rail privatisation in Japan. *Accident Analysis and Prevention* 42, 1296–1310; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.02.007>
- Evans A. W. (2011a). Fatal train accidents on Europe’s railways: 1980–2009, *Accident Analysis and*

- Prevention 43 (1): 391–401; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.09.009>
- Evans W.A. (2011b). Fatal accidents at railway level crossings in Great Britain 1946 –2009, Accident Analysis and Prevention 43 1837–184 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.04.019>
- Evans A. W. (2013). The economics of railway safety, Research in Transportation Economics 43 137-147; <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.12.003>
- Ghazel M. (2009). Using stochastic Petri nets for level-crossing collision risk assessment. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 10 (4), 668–677; <https://doi.org/10.1109/TITS.2009.2026310>
- Ghazel M., El-Koursi E.-M. (2014). Two-half-barrier level crossings versus four half-barrier level crossings: a comparative risk analysis study. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 15 (3), 1123–1133; <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2294874>
- Goran Ćirović and Dragan Pamučar (2013). Decision support model for prioritizing railway level crossings for safety improvements: Application of the adaptive neuro-fuzzy system, Expert Systems with Applications 40 (2013) 2208–2223; <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.10.041>
- Heragu S.S. and S.R. Kakuturi (1997). Grouping and placement of machine cells, IIE Transactions, 29 (7), 561–571; <https://doi.org/10.1023/A:1018549413468>
- Kendall D.G. (1953). Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chain, The Annals of Mathematical Statistics Volume 24, Number 3, 338-354
- Larue G.S., Rakotonirainy A., Haworth N.L., Darvell M. (2015). Assessing driver acceptance of Intelligent Transport Systems in the context of railway level crossings. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 30, 1–13; <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.02.003>
- Lee A. (1966). Applied Queuing Theory. New York. St Martin's Press. P. 45; <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.11009254>
- Leveson N. (2011). Applying systems thinking to analyze and learn from events, Safety Science 49 (1), 55–64; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.12.021>
- Lipovac K., Jovanović, D. (2008). Mapiranje rizika na putnoj mreži Srbije, Zbornik radova, IX Simpozijum sa međunarodnim učešćem „Prevencija saobraćajnih nezgoda na putevima 2008”, Novi Sad, 23. i 24. oktobar 2008.
- Liu B., Ghazel M., Toguyeni A. (2016). Model-based diagnosis of multi-track level crossing plants, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 17 (2), 546–556; <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2478910>
- Lobb B.; Harré N.; Terry N. (2003). An evaluation of four types of railway pedestrian crossing safety intervention, Accident Analysis and Prevention 35(4): 487–494; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00026-X)
- Lundberg J., Rollenhagen C., Hollnagel E. (2010). What you find is not always what you fix-How other aspects than causes of accidents decide recommendations for remedial actions. Accident Analysis and Prevention 42 (6) 2132–2139; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.07.003>
- Mekki A., Ghazel M., Toguyeni A. (2012). Validation of a new functional design of automatic protection systems at level crossings with model-checking techniques. IEEE Transactions on

- Intelligent Transportation Systems 13 (2), 714–723; <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2178238>
- Nixon J., Corcoran A., Fielding L. and Eastgate J. (1985). Fatal and nonfatal accidents on the railways – a study of injuries to individuals, with particular reference to children and to nonfatal trauma, *Accident Analysis and Prevention* Vol 17, No 3, 217-222; [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(85\)90054-5](https://doi.org/10.1016/0001-4575(85)90054-5)
- Perrow C. (1987). *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*. Social Science & Medicine Volume 31, Issue 10, 1990, 1187, Basic Books, New York; [https://doi.org/10.1016/0277-9536\(90\)90240-S](https://doi.org/10.1016/0277-9536(90)90240-S)
- Read G.J., Salmon P.M., Lenné M.G., Stanton N.A. (2016), Walking the line: understanding pedestrian behaviour and risk at rail level crossings with cognitive work analysis. *Applied Ergonomics* 53, 209–227; <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.10.004>
- Reason J. (1990). *Book Human Error*. Cambridge University Press, Cambridge; <https://doi.org/10.1017/CBO9781139062367>
- Reason J. (1997). *Book , Managing the Risks of Organizational Accidents*. Ashgate Publishing Ltd., Aldershot; <https://doi.org/10.4324/9781315543543>
- Reason J., Hollnagel E., Paries J. (2006). Revisiting the „Swiss cheese” model of accidents. EEC Note No. 13/06. EUROCONTROL Experimental Centre, Brétigny-sur-Orge, France; <https://doi.org/10.1518/001872008X250773>
- Salmon P.M., Read G.J., Stanton N.A., Lenné M.G. (2013). The crash at Kerang: investigating systemic and psychological factors leading to unintentional non-compliance at rail level crossings. *Accident Analysis and Prevention* 50, 1278–1288; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.09.029>
- Silla A.; Kallberg V.-P. (2012), The development of railway safety in Finland, *Accident Analysis and Prevention* 45: 737– 74; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.043>
- SNCF Réseau (2011), *World Conference of Road Safety at Level Crossings (Journée Mondiale de Sécurité Routière aux Passages à Niveau)*, France; <http://www.planetoscope.com/automobile/1271-nombre-de-collisions-aux-passages-a-niveau-en-france.html>
- SNCF Réseau (2015), *8th National Conference of Road Safety at Level Crossings (8ème Journée Nationale de Sécurité Routière aux Passages à Niveau)*, France; <http://www.sncf-reseau.fr/fr/dossier-de-presse-8eme-journee-nationale-de-securite-routiere-aux-passages-a-niveau>
- Stanton N.A., Walker G.H.(2011), Exploring the psychological factors involved in the Ladbroke Grove rail accident. *Accident Analysis and Prevention* 43 (3), 1117–1127; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.12.020>
- Stefanova T., Burkhardt J.-M., Filtner A., Wullems C., Rakotonirainy A., Delhomme P. (2015). Systems-based approach to investigate unsafe pedestrian behaviour at level crossings. *Accident Analysis and Prevention* 81 (0), 167–186; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.04.001>
- Tey L.S., Ferreira L., Wallace A. (2011), Measuring driver responses at railway level crossings. *Accident Analysis and Prevention* Volume 43, Issue 6, November 2011, 2134-2141;

<https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.06.003>

U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. <http://www.dot.gov>

Wei Y., Guo Y., Dong D., Li Dewena (2012), Public places safety management evaluation of railway stations, *Procedia Engineering* 45, 240 – 247, Published by Elsevier; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.151>

Wilson J.R. (2014). Fundamentals of systems ergonomics/human factors. *Applied Ergonomics* 45, 5–13; <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.03.021>

Wigglesworth E.C. (2001), A human factors commentary on innovations at railroad-highway grade crossings in Australia. *Journal of Safety Research* 32 (3), 309–321; [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(01\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(01)00053-6)

Xiang L., M. R. Saat, C. P.L. Barkan (2013), Integrated risk reduction framework to improve railway hazardous materials transportation safety, *Journal of Hazardous Materials* 260 131–140; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.052>

## 2. BEZBEDNOST NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA, DEFINICIJA I KARAKTERISTIKE

### 2.1. POJAM NESREĆA I NEZGODA

Prema čl. 2 tač. 40), 41) i 43) [Zakona o bezbednosti u železničkom saobraćaju \(Službeni glasnik RS broj 41 od 31.05.2018. godine\)](#) kaže se da je :

- nezgoda događaj, osim nesreće i ozbiljne nesreće, koji je povezan sa saobraćajem vozova ili manevarskog sastava i negativno utiče na bezbednost saobraćaja;
- nesreća neželjen ili neplaniran iznenadan događaj ili specifičan niz takvih događaja koji ima štetne posledice (sudari, iskliznuća, nesreće na putnom prelazu u istom nivou, nesreće sa učešćem lica izazvane železničkim vozilima u pokretu, požari i sl.);
- ozbiljna nesreća sudar vozova ili iskliznuće voza koji ima za posledicu smrt najmanje jednog lica ili teške povrede pet ili više lica ili nanošenje velike štete železničkim vozilima, železničkoj infrastrukturi ili životnoj sredini, kao i druga slična nesreća koja ima očigledan uticaj na bezbednost na železnici ili na upravljanje bezbednošću.

Primeri nezgoda su: izbegnut sudar voza sa železničkim vozilom, izbegnut sudar voza sa preprekom unutar slobodnog profila, prolaz voza ili pružnog vozila pored signala kojim se zabranjuje dalja vožnja ili mesta od koga je dalja vožnja zabranjena, osim u slučaju kada se takva vožnja odvija po nalogu nadležnog lica koje reguliše saobraćaj, nedozvoljeno manevrisanje (neblagovremeno obustavljanje manevrisanja, prelazak signala granica manevrisanja i sl.), slomljena šina, točak ili osovina, svaki nedostatak vezan za kontinuitet i geometriju koloseka koji zahteva zatvaranje koloseka ili trenutno smanjenje dozvoljene brzine (deformacija koloseka), raskinuće voza, sudari vozila pri manevrisanju, odbegnuća železničkih vozila, presečenja skretnica, kvarovi signalno-sigurnosnih sistema čije su manifestacije manje restriktivne od potrebnih, prolazi voza ili vozila preko putnih prelaza osiguranih SS uređajima koji nisu obezbeđeni za prolaz voza ili vozila, padanje predmeta u slobodan profil pruge koji mogu ugroziti bezbedan saobraćaj, elementarne nepogode koje prema posledicama ne spadaju u nesreće (poplave, lavine, odroni, klizanje terena, led, atmosferska pražnjenja i sl.), pogrešno rukovanje rastavljačem kontaktne mreže, neobezbeđen ili nepravilno obezbeđen put vožnje i sl.

Pojedini primeri nesreća su: sudar voza sa železničkim vozilom, sudar voza sa preprekom unutar profila, iskliznuće voza ili manevarskog sastava, nesreća u kojoj su stradala lica izazvana železničkim vozilom u pokretu, požar ili eksplozija do koje dođe na železničkom vozilu (uključujući i njegov tovar) dok saobraća između polazne i uputne stanice, kao i kada stoji u polaznoj stanici, uputnoj stanici ili u međustanici ili tokom manevrisanja i drugo.

Nesreća na putno-pružnom prelazu je nesreća u kojoj učestvuje najmanje jedno železničko vozilo i jedno ili više drumskih vozila koja prelaze putni prelaz u nivou, ostali korisnici prelaza, kao što

su pešaci, ili predmeti koji su privremeno prisutni na koloseku ili se nalaze u blizini koloseka, ukoliko ih je izgubilo drumsko vozilo ili korisnik prelaza<sup>4</sup>.

U ovoj disertaciji akcentat će biti na istraživanju nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima.

## **2.2. OSNOVNA DEFINICIJA PUTNO-PRUŽNOG PRELAZA I PROPISI KOJI REGULIŠU OBLAST UPRAVLJANJA SAOBRAĆAJEM NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA**

Mesto ukrštanja železničke pruge i puta, odnosno putno-pružni prelaz, je mesto u naseljenom ili van naseljenog područja grada ili opštine, gde se presecaju osa koloseka železničke pruge i osa kolovoza puta, u nivou koloseka. Tačka u kojoj se seku železnička i drumska saobraćajnica u nivou definisana je različitim pojmovima: putni prelaz, ukrštaj pruge i puta, ukrštaj, prelaz puta preko pruge, pružno-putni prelaz, putno-pružni prelaz, pružni prelaz i sl. U ovoj disertaciji koristiće se termin putno-pružni prelaz. Bezbedno odvijanje kako železničkog tako i drumskog saobraćaja na putno-pružnim prelazima je utemeljeno u zakonskoj regulativi. To je okvir koji definiše obaveze u postupanju oba učesnika u saobraćaju.

Prema definiciji u čl. 2 tač. 54 [Zakona o železnici \(„Službeni glasnik RS” br. 41 od 31. maja 2018. godine\)](#) putno-pružni prelaz je mesto ukrštanja železničke pruge koja pripada javnoj železničkoj infrastrukturi, industrijskoj železnici ili industrijskom koloseku i puta u istom nivou, koji obuhvata i ukrštanje tih koloseka sa pešačkom ili biciklističkom stazom, u širini od 3 m mereno od ose koloseka, uključujući i prostor između koloseka kada se na putnom prelazu nalazi više koloseka. U ovom zakonu, od čl. 61 do čl. 69, detaljno su propisane sve odredbe koje se odnose na obaveze kako upravljača železničke infrastrukture tako i upravljača putne infrastrukture, u smislu upravljanja saobraćajem, rekonstrukcijom i održavanjem putno-pružnih prelaza. Pod pojmom upravljača železničkom infrastrukturu misli se na: upravljač infrastrukture, operator uslužnog objekta, vlasnik, odnosno ovlašćeni upravljač industrijskog koloseka koji čini deo železničke infrastrukture, dok putnom, uličnom i pešačkom infrastrukturu i saobraćajem upravlja upravljač putne infrastrukture. Upravljač železničke infrastrukture, kao i upravljač puteva, dužni su da na putnom prelazu sprovedu mere za bezbedan i nesmetan saobraćaj i da putne prelaze održavaju u stanju kojim se obezbeđuje bezbedno i nesmetano odvijanje saobraćaja, u skladu sa zakonima kojima se uređuje bezbednost u železničkom saobraćaju i bezbednost saobraćaja na putevima. Sve navedene odredbe Zakona o železnici, od tač. 61 do tač. 69, važe i za putne prelaze na industrijskoj železnici i industrijskim kolosecima za sopstvene potrebe, kao i na kolosecima smeštenih unutar železničkih radionica za popravku, depoa ili garaža za lokomotive, a posebno u pogledu prava i obaveza privrednog društva ili drugog pravnog lica koji upravlja industrijskom železnicom, kao i vlasnika, odnosno korisnika industrijskog koloseka za sopstvene potrebe. U delu XIII, čl. 96 i čl. 97 [Zakona o bezbednosti u železničkom saobraćaju \(„Službeni glasnik RS”, broj 41 od 31. maja 2018. godine\)](#) propisane su sve neophodne bezbednosne mere na putno-pružnim prelazima.

---

<sup>4</sup> Čl. 2 tač. 8 Pravilnika o prijavljivanju, istraživanju, evidentiranju, statističkom praćenju i objavljivanju podataka o nesrećama i nezgodama („Službeni glasnik RS”, broj 32 od 02.04.2021. godine)

U [Zakonu o bezbednosti saobraćaja na putevima \(„Sl. glasnik RS”, br. 41/2009, 53/2010, 101/2011, 32/2013 - odluka US, 55/2014, 96/2015 - dr. zakon, 9/2016 - odluka US, 24/2018, 41/2018, 41/2018 - dr. zakon, 87/2018, 23/2019 i 128/2020 - dr. zakon\)](#) u članu 7, stav 1, tačka 28 definiše se da je prelaz puta preko pruge mesto na kojem se u istom nivou ukrštaju put i železnička ili tramvajska pruga. U ovom zakonu se propisuje zabrana preticanja i zaustavljanja u području putno-pružnog prelaza, obaveza da na navedenom mestu, vozači u drumskom saobraćaju propuste šinsko vozilo koje se kreće po pruzi i da prilikom približavanja putno-pružnom prelazu podese kretanje vozila tako da ga mogu zaustaviti pred putno-pružnim prelazom, kao i detaljno propisivanje načina i postupka obeležavanja prelaza puta preko železničke pruge.

U [Zakonu o putevima \(„Službeni glasnik RS”, br. 41 od 31. maja 2018, 95 od 8. decembra 2018 - dr. zakon\)](#) u čl. 2 tač. 42) definiše se pojam „ukrštaj” kao mesto ukrštanja puta sa drugim linijskim infrastrukturnim objektima u istom ili različitim nivoima.

Podzakonskim aktom, [Pravilnikom o načinu ukrštanja železničke pruge i puta, pešačke ili biciklističke staze, mestu na kojem se može izvesti ukrštanje i merama za osiguranje bezbednog saobraćaja \(„Službeni glasnik RS”, br. 89/2016\)](#) su bliže uređena sledeća pitanja:

1. ukrštanja železničke pruge i puta, pešačke ili biciklističke staze u nivou koloseka i van nivoa koloseka;
2. mera za obezbeđenje saobraćaja na putnim prelazima i
3. odstupanja od propisanih mera.

U praksi se često susreću termini: „neposednut putni prelaz” i „neosiguran putni prelaz”. Mora se precizno naglasiti da ne postoji „neposednut putni prelaz”. Ovaj izraz je neosnovano koristio upravljač javne železničke infrastrukture zbog problema sa nedovoljnim brojem železničkih radnika (otpravnici vozova i čuvari putnog prelaza) koji su imali zadatak da manipulišu-rukuju sa uređajima putnog prelaza. Zbog toga je u železničkim internim aktima uvedena oznaka kojom je bilo označeno na kojim putnim prelazima nisu angažovani železnički radnici (crni romb pored putnog prelaza u Knjižici reda vožnje). Ukidanjem ove oznake od strane Direkcije za železnice, upravljač javne železničke infrastrukture je izvršio posadanje svih službenih mesta železničkim osobljem koje rukuje sa uređajima putnog prelaza. Izraz „neosiguran putni prelaz” se neosnovano koristi od strane lica koja ne poznaju u dovoljnoj meri regulativu koja uređuje ovu oblast. [Pravilnikom o načinu ukrštanja železničke pruge i puta, pešačke ili biciklističke staze, mestu na kojem se može izvesti ukrštanje i merama za osiguranje bezbednog saobraćaja \(„Službeni glasnik RS”, br. 89/2016\)](#) saobraćaj na putnim prelazima je **uvek obezbeđen** i to jednim od šest nivoa obezbeđenja:

1. saobraćajnim znacima na putu i zonom potrebne preglednosti;
2. svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu;
3. automatskim polubranicima sa svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu;
4. branicima i saobraćajnim znacima na putu;
5. neposrednim regulisanjem saobraćaja na putnom prelazu i posebnim merama i
6. zaštitnim ogradama i saobraćajnim znacima ili mimoilaznicama i saobraćajnim znacima na putnim prelazima za pešake i bicikliste.

U podzakonskom aktu, [Pravilniku o zajedničkim pokazateljima bezbednosti u železničkom saobraćaju \(„Službeni glasnik RS” broj 25 od 03.04.2019. godine\)](#) u čl. 2 u tač. 1 i tač. 21 izvršena je podela putno-pružnih prelaza na pasivne i aktivne prelaze.

Pasivni putno-pružni prelaz u nivou je prelaz koji nije opremljen sistemom za upozorenje i/ili zaštitu koji se aktivira u slučaju kada za korisnika nije bezbedno da prelazi preko prelaza. Pasivni putno-pružni prelazi su obično obezbeđeni saobraćajnim znacima na putu i zonom potrebne preglednosti, koji najavljuju nailazak na železničku prugu bez branika i polubranika i zahtevaju posebnu opreznost prilikom prelaska preko pruge. Takođe, u mnogim zemljama postoji veliki broj putno-pružnih prelaza koji nisu identifikovani, već su nastali samoinicijativno, od strane lokalnih korisnika puteva i na taj način prečicom ostvarili nepropisno ukrštanje puta sa železničkom prugom.

Aktivni putno-pružni prelaz u nivou je putno-pružni prelaz na kojem su korisnici prelaza zaštićeni ili se upozoravaju na približavanje voza aktiviranjem uređaja u slučaju kada za korisnika nije bezbedno da prelazi preko prelaza. Aktivni putno-pružni prelazi preko pruge se dele na prelaze koji su kontrolisani ručnim i automatskim upravljanjem. U slučaju ručnog upravljanja, uređaj putno-pružnog prelaza aktivira ovlašćeno lice upravljača železničke infrastrukture, kada primi informaciju putem sredstava dokaznog sporazumevanja u sklopu bezbednog organizovanja saobraćaja, a automatsko upravljanje uređajem putno-pružnog prelaza zasnovano je na voznim sensorima. Za aktivne putno-pružne prelaze, zajednički je element postojanje barijera koje se spuštaju kada se voz približava putno-pružnom prelazu, kako bi se sprečio prelaz drumskih vozila ili pešaka. Pored navedenih, postoje i drugi načini obaveštavanja učesnika u drumskom saobraćaju, pešaka i biciklista o postojanju prepreka koje blokiraju njihov put. Naime, u upotrebi su supersonični talasi i laserske grede, gde se na osnovu zvučnih i laserskih talasa učesnici u drumskom saobraćaju, pešaci i biciklisti obaveštavaju o nailasku na prepreku.

Trećim podzakonskim aktom koji reguliše navedenu oblast, [Pravilnikom o saobraćajnoj signalizaciji \(„Službeni glasnik RS”, br. 85/2017 i 14/2021\)](#) učesnici u drumskom saobraćaju se saobraćajnim znakovima na putu obaveštavaju i upozoravaju o nailasku na putno-pružni prelaz, vrsti osiguranja saobraćaja na putnom prelazu i udaljenosti od putno-pružnog prelaza i dr.

Ukoliko se radi o putno-pružnom prelazu na kojem je saobraćaj osiguran saobraćajnim znacima na putu i zonom potrebne preglednosti, neophodno je učesnike u drumskom saobraćaju upozoriti signalnim znakom: „ukrštanje puta sa železničkom prugom bez branika ili polubranika” (I -33):



I-33

**Slika 2.1.** Saobraćajni znak: „Ukrštanje puta sa železničkom prugom bez branika ili polubranika” (I -33)

Na udaljenosti 240 m od putnog prelaza se postavlja signalni znak I-33 (sl. 2.1) i ovaj znak se postavlja na stub od znaka „približavanje mestu ukrštanja puta i železničke pruge” (I-35) sl. 2.2:





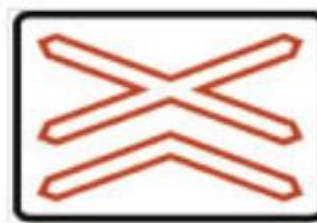
**Slika 2.2.** Saobraćajni znak: „Približavanje mestu ukrštanja puta i železničke pruge” (I-35)

Na neposrednoj udaljenosti od putno-pružnog prelaza se postavljaju signalni znaci (sl. 2.3):

- „Andrejin krst” koji označava nailazak na ukrštanje puta i železničke pruge u nivou sa jednim kolosekom (I-34), odnosno sa dva ili više koloseka (I-34.1),



I-34



I-34.1

**Slika 2.3.** Saobraćajni znak: „Andrejin krst” nailazak na ukrštanje puta i železničke pruge u nivou sa jednim kolosekom (I-34), odnosno sa dva ili više koloseka (I-34.1)

i

- „Obavezno zaustavljanje” (II-2), sl. 2.4, koji označava naredbu vozaču da mora da bezuslovno zaustavi vozilo i ustupi prvenstvo prolaza železničkim vozilima koja se kreću prugom.



II-2

**Slika 2.4.** Saobraćajni znak: „Obavezno zaustavljanje” (II-2)

Ukoliko se radi o putno-pružnom prelazu na kojem je saobraćaj osiguran svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu, neophodno je učesnika u drumskom saobraćaju upozoriti signalnim znakom: „ukrštanje puta sa železničkom prugom bez branika ili polubranika” (I-33) koji se postavlja na 240 m ispred putno-pružnog prelaza, zajedno sa signalnim znakom I-35. U

neposrednoj blizini ispred putno-pružnog prelaza postavljaju se signalni znaci I-34 ili I-34.1 i signalni znak „Semafor za regulisanje prelaza puta preko željezničke pruge u istom nivou” sl. 2.5. (VI-9):



**Slika 2.5.** Saobraćajni znak: „Semafor za regulisanje prelaza puta preko željezničke pruge u istom nivou” (VI-9)

U ovom slučaju nije potrebno postavljati signalni znak II-2 jer signalni znak VI-9 služi za najavu približavanja voza.

Obaveza učesnika u drumskom saobraćaju je da, prilikom aktiviranja semafora bezuslovno zaustave vozilo i ustupe prvenstvo prolaza željezničkim vozilima koja se kreću prugom.

Ukoliko se radi o putno-pružnom prelazu na kojem je saobraćaj osiguran automatskim polubranicima sa svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu (sl. 2.6), neophodno je učesnika u drumskom saobraćaju upozoriti signalnim znakom: „ukrštanje puta sa željezničkom prugom sa branicima ili polubranicima” (I-32):



**Slika 2.6.** Saobraćajni znak: „Ukrštanje puta sa željezničkom prugom sa branicima ili polubranicima” (I-32)

koji se postavlja na 240 m ispred putno-pružnog prelaza, zajedno sa signalnim znakom I-35. U neposrednoj blizini ispred putno-pružnog prelaza postavljaju se signalni znaci I-34 ili I-34.1 i signalni znak VI-9. I u ovom slučaju nije potrebno postavljati signalni znak II-2 jer signalni znak VI-9 služe za najavu približavanja voza. Obaveza učesnika u drumskom saobraćaju je da, prilikom aktiviranja semafora, bezuslovno zaustave vozilo i ustupe prvenstvo prolaza željezničkim vozilima koja se kreću prugom

Ukoliko se radi o putno-pružnom prelazu na kojem je saobraćaj osiguran branicima i saobraćajnim znacima na putu neophodno je učesnike u drumskom saobraćaju, na 240 m ispred putno-pružnog prelaza (zajedno sa signalnim znakom I-35) upozoriti signalnim znakom I-32 da nailaze na putno-pružni prelaz sa branicima ili polubranicima. U neposrednoj blizini ispred putno-pružnog prelaza se postavljaju signalni znaci I-34 ili I-34.1. Nije potrebno postavljati signalni znak II-2 jer položaj branika ili polubranika ukazuje da se radi o dozvoljenom ili nedozvoljenom prelazu preko putnog

prelaza. Obzirom da je signalni znak II-2 bezuslovno zaustavljanje učesnika u drumskom saobraćaju, onda bi svaki učesnik u drumskom saobraćaju koji ne zaustavi vozilo kada su branici ili polubranici podignuti pravio saobraćani prekršaj, a ukoliko bi se svako vozilo zaustavljalo poštujući saobraćajni znak stvarali bi se nepotrebni zastoji u saobraćaju, što bi posebno bilo izraženo na frekventnim putevima<sup>5</sup>.

Učesnici u železničkom saobraćaju (vozno osoblje) signalima za automatske uređaje na putnim prelazima, obaveštavaju se o ispravnosti automatskih uređaja za obezbeđenje saobraćaja na putno-pružnim prelazima koje uključuje u rad nailazeći voz<sup>6</sup>. Ispravnost ovih uređaja se kontroliše na dva načina:

- a) kontrolnim uređajima ugrađenim u jednom neprekidno posednutom službenom mestu (daljinska kontrola);
- b) kontrolnim svetlosnim signalima ugrađenim na određenom odstojanju ispred putno-pružnog prelaza.

Ako je saobraćaj vozova na putno-pružnim prelazima obezbeđen na način naveden pod a), na pruži se ispred putno-pružnog prelaza ugrađuju samo signali koji označavaju početak zaustavnog puta ispred putno-pružnog prelaza, signalni znak 58 (sl. 2.12), a izuzetno se označava i mesto uključne tačke sa daljinskom kontrolom, signalni znak 57a (sl. 2.11), ako se uključna tačka nalazi na manjoj ili većoj udaljenosti od zaustavnog puta.

Ako je saobraćaj na putno-pružnim prelazima obezbeđen na način naveden pod b), na pruži se ispred putno-pružnih prelaza ugrađuju: kontrolni svetlosni signali, pomoćni kontrolni svetlosni signali (po potrebi) i signali uključne tačke. Stubovi kontrolnih i pomoćnih svetlosnih signala obojeni su sa prednje strane kosim crno-belim prugama jednakih širina.

Na slici 2.7. predstavljen je signalni znak 55: „Uređaj na putnom prelazu u kvaru”, jedna žuta mirna svetlost prema vozu, dnevni i noćni znak.

Na slici 2.8. predstavljen je signalni znak 56: „Uređaj na putnom prelazu ispravan”, jedna žuta mirna svetlost i iznad nje jedna bela trepćuća svetlost prema vozu, dnevni i noćni znak. Bela trepćuća svetlost se pali i gasi u ritmu drumskog saobraćajnog znaka ispred putno-pružnog prelaza.

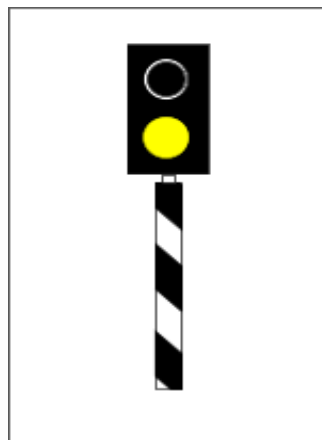
Na slici 2.9. predstavljen je pomoćni kontrolni svetlosni signal koji ima iste signalne znake kao i kontrolni svetlosni signalni znak 55: „Uređaj na putnom prelazu u kvaru” i kontrolni svetlosni signalni znak 56: „Uređaj na putnom prelazu ispravan”. Stub je obojen crno-belim kosim prugama, kao i kontrolni svetlosni signal, s tim što ispod signalne ploče na stubu ima reflektujuće mlečnobelo staklo u crnom okviru. Pomoćni kontrolni signal (sl. 2.9) se ugrađuje između kontrolnog svetlosnog signala i putno-pružnog prelaza na onom delu pruge na kojem voz ima zadržavanje između kontrolnog svetlosnog signala i putno-pružnog prelaza, a zatim nastavlja vožnju u pravcu putno-pružnog prelaza. Za dalju vožnju voza od pomoćnog kontrolnog signala mora se postupiti prema odredbama čl. 143 [Pravilnika o vrstama signala, signalnih oznaka i oznaka na pruži \(„Sl.glasnik RS” broj 51/20 od](#)

<sup>5</sup> Sve slike saobraćajnih signalnih znakva na putu preuzete iz Pravilnika o saobraćajnoj signalizaciji („Službeni glasnik RS”, br. 85/2017 i 14/2021)

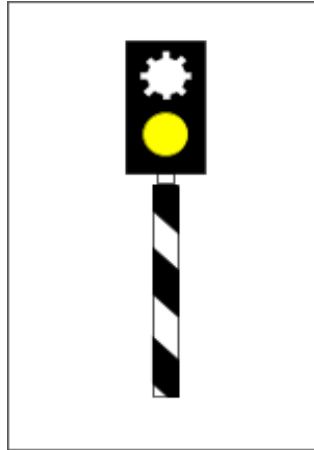
<sup>6</sup> Pravilnik o vrstama signala, signalnih oznaka i oznaka na pruži („Sl. glasnik RS” broj 51/20 od 14.04.2020. godine)

14.04.2020. godine). Na slici 2.10. predstavljen je signalni znak 57: „Uključna tačka, očekuj kontrolni signal”, pravougaona crna tabla sa četiri bela romba postavljena jedan ispod drugog, dnevni i noćni znak. Ako je uključna tačka zajednička za dva ili tri putno-pružna prelaza, na signalnoj tabli nalaze se 2 ili 3 crvena romba jedan ispod drugog. Ovaj signalni znak naređuje da se mora osmatrati da li kontrolni svetlosni signal pokazuje signalni znak 55: „Uređaj na putnom prelazu u kvaru” ili kontrolni svetlosni signalni znak 56: „Uređaj na putnom prelazu ispravan”. Po prelasku prve osovine voza preko uključne tačke, na kontrolnom svetlosnom signalu pojavljuje se bela trepuća svetlost kada je uređaj na putno-pružnom prelazu ispravan. Ukoliko se, odmah po prolasku voza pored signalnog znaka 57: „Uključna tačka, očekuj kontrolni signal”, na kontrolnom svetlosnom signalu ne pojavi signalni znak 56: „Uređaj na putnom prelazu ispravan”, mašinovođa mora više puta dati signalni znak 67: „Pazi” i voz bezuslovno zaustaviti ispred područja putno-pružnog prelaza. Postupak za dalju vožnju voza, način obaveštavanja stanica o kvaru automatskih uređaja na putno-pružnom prelazu od strane voznog osoblja, propisan je kroz [Saobraćajni pravilnik \(„Službeni glasnik ZJŽ” br. 3/94, 4/94, 5/94, 4/96 i 6/03\)](#). Ako se po prolasku pored signalnog znaka 57: „Uključna tačka, očekuj kontrolni signal” na kontrolnom svetlosnom signalu pojavi signalni znak 56: „Uređaj na putnom prelazu ispravan”, za dalju vožnju voza preko putno-pružnog prelaza nema nikakvih smetnji.

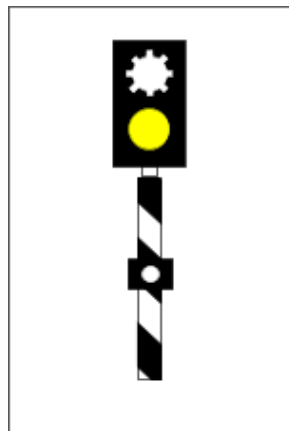
Ako je po prolasku voza pored signalnog znaka 57: „Uključna tačka, očekuj kontrolni signal” kontrolni signal neosvetljen, smatra se kao da kontrolni signal pokazuje signalni znak 55: „Uređaj na putnom prelazu u kvaru” i postupak za dalju vožnju voza je identičan kao za slučaj kvara uređaja putno-pružnog prelaza.



**Slika 2.7.** Signalni znak 55: „Uređaj na putnom prelazu u kvaru”

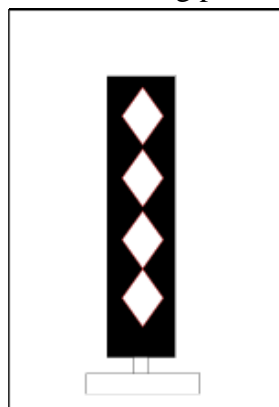


**Slika 2.8.** Signalni znak 56: „Uređaj na putnom prelazu ispravan”

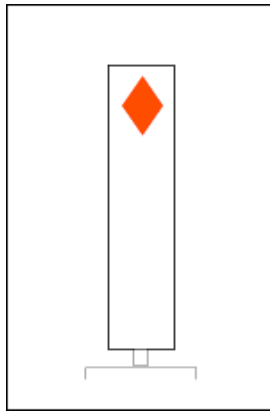


**Slika 2.9.** Signalni znak za pomoćni kontrolni signal

Na slici 2.11. predstavljen je signalni znak 57a: „Uključna tačka sa daljinskom kontrolom” , pravougaona bela tabla sa jednim crvenim rombom pri vrhu, dnevni i noćni znak. Izuzetno se ugrađuje ispred putno-pružnih prelaza bez kontrolnih svetlosnih signala samo u slučaju ako je uključna tačka postavljena na manjoj ili većoj udaljenosti od zaustavnog puta.

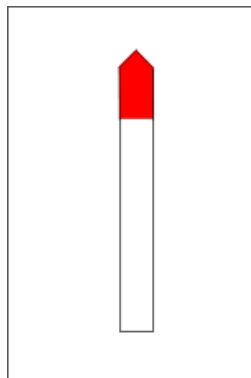


**Slika 2.10.** Signalni znak 57: „Uključna tačka, očekuj kontrolni signal”



**Slika 2.11.** Signalni znak 57a: „Uključna tačka sa daljinskom kontrolom”

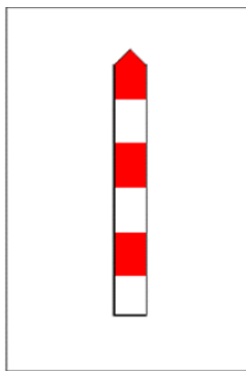
Na slici broj 2.12. predstavljen je signalni znak 58: „Početak zaustavnog puta ispred putnog prelaza”, beli stub sa crvenim vrhom, dnevni i noćni znak.



**Slika 2.12.** Signalni znak 58: „Početak zaustavnog puta ispred putnog prelaza”

Ugrađuje se ispred putno-pružnih prelaza na kojima je saobraćaj obezbeđen branicima, polubranicima ili svetlosnim signalima, osim kod onih kod kojih je saobraćaj obezbeđen automatskim uređajima čija se ispravnost kontroliše svetlosnim signalima ugrađenim ispred putno-pružnog prelaza. Ovaj znak označava mesto odakle mašinovođa mora početi pripremu za kočenje, odnosno kočenje voza kada voz treba da se zaustavi ispred putno-pružnog prelaza kod kojeg su uređaji neispravni. Ugrađuje se na daljini zaustavnog puta ispred putno-pružnog prelaza.

Na slici 2.13. predstavljena je pružna opomenica, signalna oznaka 209: „Pazi, putni prelaz”, stub obojen naizmenično crvenim i belim prugama.



**Slika 2.13.** Signalna oznaka 209: „Pazi, putni prelaz”

Pružna opomenica se ugrađuje ispred putno-pružnih prelaza kod kojih saobraćaj nije obezbeđen branicima, polubranicima ili svetlosnim signalima, odnosno ispred svih putno-pružnih prelaza ispred kojih se ne postavljaju kontrolni svetlosni signali ili signali za početak zaustavnog puta ispred putno-pružnog prelaza<sup>7</sup>.

Pružna opomenica se ugrađuje s desne strane koloseka za odnosni smer vožnje. Pružna opomenica na pruzi sa obostranim saobraćajem ugrađuje se sa spoljne strane oba koloseka u oba smera vožnje. Pružna opomenica se ugrađuje ispred putno-pružnog prelaza na udaljenosti od 500 m na magistralnim i regionalnim prugama, a na 200 m na sporednim prugama.

Ako se putno-pružni prelaz nalazi na staničnom delu pružnog koloseka na izlaznoj strani stanice u smeru kretanja voza, pružna opomenica se ugrađuje ispred prve ulazne skretnice na ulaznoj strani stanice u smeru kretanja voza ali ne na manjem odstojanju od 500 m ispred putno-pružnog prelaza.

Signalna oznaka 209: „Pazi, putni prelaz”, upozorava mašinovođu da kod ove oznake mora dati signalni znak 67: „Pazi” i ponavljati ga više puta sve do nailaska na putno-pružni prelaz, radi najavljiivanja učesnicima drumskog saobraćaja da se voz približava putno-pružnom prelazu. Kod guranih vozova mašinovođa mora davati signalni znak 67: „Pazi” kada prva kola dođu do pružne opomenice i ponavljati ga više puta sve do nailaska prvih kola na putno-pružni prelaz. Pružna opomenica se mora videti sa najmanje udaljenosti od 400 m na prugama sa zaustavnim putem od 1500 m, od 300 m na prugama sa zaustavnim putem od 1000 m i od 200 m na prugama sa zaustavnim putem od 700 m .

### **2.3. PRIKAZ STANJA BEZBEDNOSTI NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U REPUBLICI SRBIJI I ZEMLJAMA U OKRUŽENJU**

U toku 2018. godine [Agencija za bezbednost saobraćaja RS](#) vršila je istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama putno-pružnih prelaza, na osnovu čega je urađena vrlo obimna i kvalitetna studija sa ciljem unapređenja bezbednosti saobraćaja na prelazima preko pruge. Studijsko područje prikupljenih podataka je iz relevantnih izvora u zemljama Evropske Unije, čiji podaci su prikazani u tabeli 2.1. Prezentovano je trenutno stanje na postojećim putno-pružnim prelazima duž

<sup>7</sup> Sve slike signalnih znakova i oznaka na pruzi preuzete su iz Pravilnika o vrstama signala, signalnih oznaka i oznaka na pruzi („Sl.glasnik RS” broj 51/20 od 14.04.2020. godine)

mreže železnica i puteva zemanja članica ACROSSEE (*Accessibility improved at border Crossing for the integration of SouthEast Europe, 2014*).

**Tabela 2.1**<sup>8</sup> Podaci o nesrećama na putnim prelazima u EU 2004-2015. i Srbiji 2007-2016.

Država	Broj aktivnih putno-pružnih prelaza	Broj pasivnih putno-pružnih prelaza	Ukupan broj nesreća na putno-pružnim prelazima	Broj poginulih lica	Broj teško povređenih lica	Podaci se odnose na period posmatranja (god.)
Grčka	806	781	196	109	165	2004-2015
Mađarska	2890	3151	510	304	283	2004-2015
Italija	4361	1239	273	170	100	2004-2015
Rumunija	1787	3475	787	342	524	2004-2015
Austrija	1886	2794	491	230	352	2004-2015
Bugarska	646	137	109	46	91	2006-2015
Grčka	806	781	196	109	165	2004-2015
Slovenija	335	503	221	57	125	2004-2015
Hrvatska	594	924	216	139	162	2004-2015
Srbija	535	1593	1174	59	282	2007-2016

U zemljama članicama ERA (*European Railway Agency*) broj putno-pružnih prelaza zavisi od razvijenosti države, gustine železničke i drumske mreže i veličine države. Broj i raspored aktivnih i pasivnih prelaza se razlikuje od države do države i zavisi od mnogo faktora. U tabeli 2.1, kod ukupnog broja nesreća na putno-pružnim prelazima u Republici Srbiji, 833 od 1174 nesreća, čine nesreće samo sa materijalnom štetom bez usmrćenih i povređenih lica.

U situaciji nemogućnosti poređenja stanja bezbednosti saobraćaja između država na osnovu apsolutnih pokazatelja, [Agencija za bezbednost saobraćaja RS \(2018\)](#), je razmotrila određene relativne pokazatelje bezbednosti saobraćaja i na osnovu dostupnih podataka o saobraćajnim nesrećama i nezgodama i njihovim posledicama (od 2010. godine do 2014. godine) i broja putno-pružnih prelaza i definisala tri relativna pokazatelja bezbednosti saobraćaja:

- broj nesreća i nezgoda sa nastradalim na putno-pružnim prelazima, na 1.000 prelaza;
- broj nastradalih u nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima, na 1.000 prelaza;
- broj poginulih u nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima, na 1.000 prelaza,

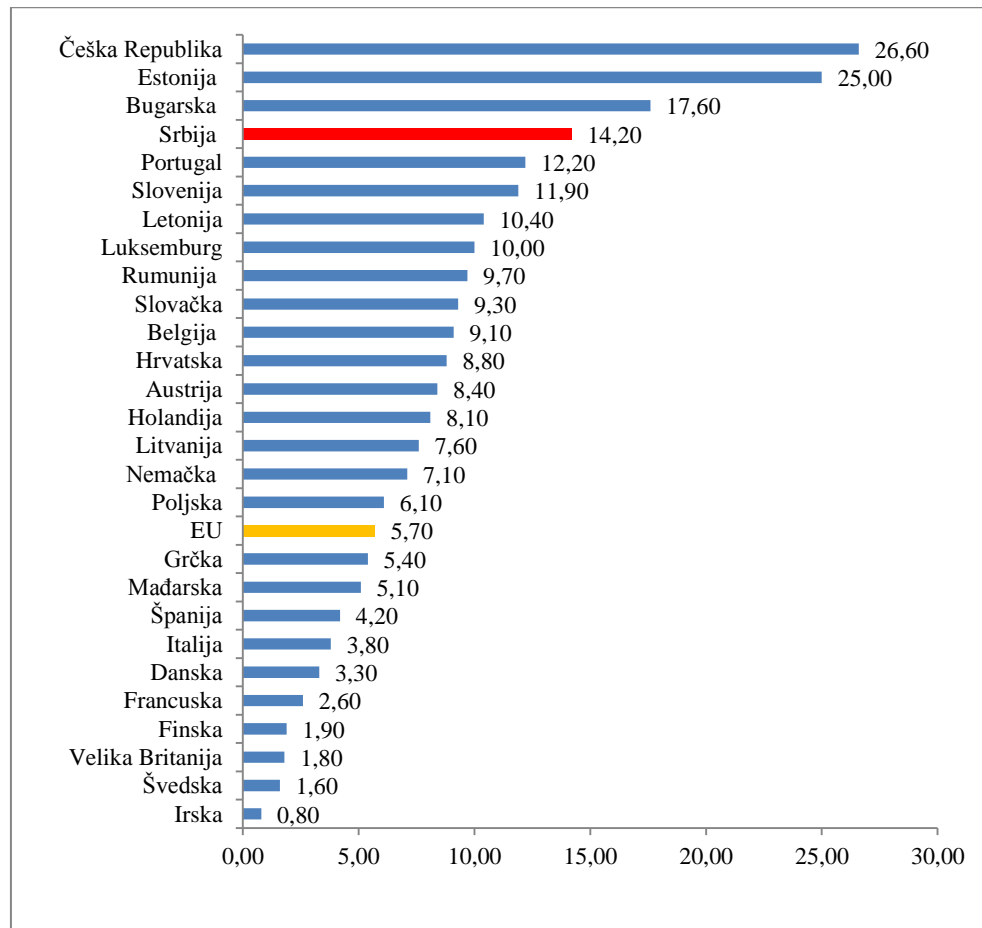
što je prikazano na graficima 2.1, 2.2. i 2.3.

Na osnovu broja nesreća i nezgoda sa nastradalim na putno-pružnim prelazima na 1.000 prelaza u periodu od 2010. do 2014. godine ova vrednost na nivou EU je 5,7, dok u Srbiji iznosi 14,2. Najveći

<sup>8</sup> Studija „Istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama pružnih prelaza” 2018. Agencije za bezbednost saobraćaja RS



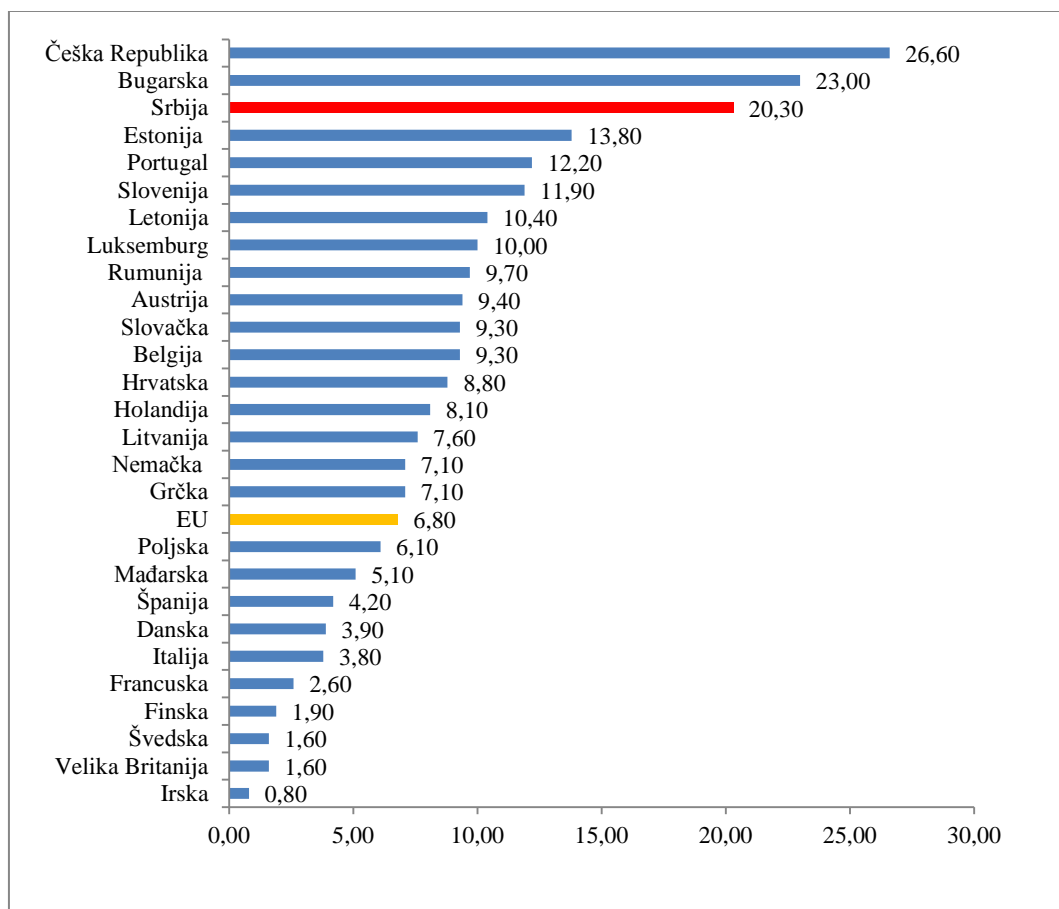
broj nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima ima Češka Republika (26,6), a zatim Estonija (25,0) i Bugarska sa 17,6. Mali broj nesreća i nezgoda je u skandinavskim zemljama Danskoj, Finskoj i Švedskoj, kao i u Velikoj Britaniji, Irskoj i Francuskoj (**grafik 2.1**).



**Grafik 2.1.** Broj nesreća i nezgoda sa nastradalim na putno-pružnim prelazima na 1.000 prelaza - Srbija i EU, 2010-2014<sup>9</sup>

Po broju nastradalih u nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima na 1.000 prelaza prema dobijenim podacima izdvajaju se Češka Republika (26,6) i Bugarska (23,0). U Srbiji je u analiziranom periodu bilo 20,3 nastradalih na 1.000 prelaza. Na nivou EU vrednost je 6,8. I ovde je, logično, kao i na Grafiku 2.1, uočljiv mali broj nastradalih u skandinavskim državama (Danska, Finska i Švedska), kao i u Velikoj Britaniji, Francuskoj i Irskoj (**grafik 2.2**).

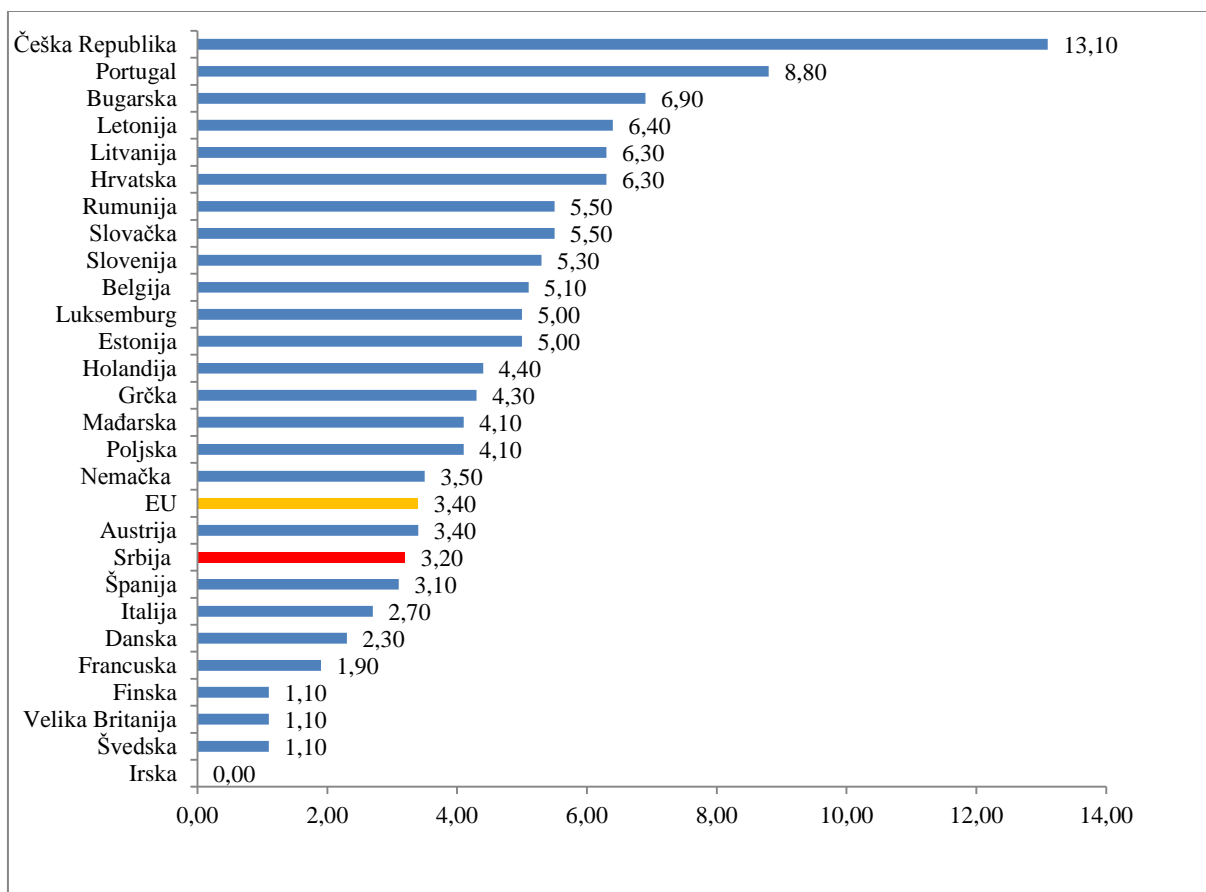
<sup>9</sup> Studija „Istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama pružnih prelaza” 2018. Agencije za bezbednost saobraćaja RS



**Grafik 2.2.** Broj nastradalih u nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima na 1.000 prelaza - Srbija i EU, 2010-2014<sup>10</sup>

Po broju usmrćenih u nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima na 1.000 prelaza na prvom mestu je Češka Republika (13,1). Na nivou EU vrednost je 3,4, a u Srbiji vrednost broja usmrćenih je 3,2. U zemljama EU po malom broju usmrćenih izdvajaju se Finska, Švedska, Velika Britanija, Francuska i Irska (**grafik 2.3**).

<sup>10</sup> Studija „Istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama pružnih prelaza” 2018. Agencije za bezbednost saobraćaja RS



**Grafik 2.3.** Broj usmrćenih u nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima na 1.000 prelaza - Srbija i EU, 2010-2014<sup>11</sup>

## 2.4. MERE ZA PODIZANJE BEZBEDNOSTI NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA

Putno-pružni prelazi kao mesto ukrštanja dva vida saobraćaja (železničkog i drumskog) prouzrokuju rizike u bezbednosti kod odvijanja oba vida saobraćaja. U cilju smanjenja potencijalne opasnosti od nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima, preduzima se niz mera da se broj prelaza, ako ne sasvim ukine, a ono što je moguće više smanji.

Ove mere suštinski podrazumevaju:

- ukidanje putno-pružnih prelaza u nivou, odnosno njihova zamena nadvožnjacima ili podvožnjacima;
- smanjenje broja putno-pružnih prelaza spajanjem dva ili više obližnjih putno-pružnih prelaza u jedan, ukoliko su dostupni alternativni pravci za odvijanje drumskog saobraćaja;

<sup>11</sup> Studija „Istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama pružnih prelaza” 2018. Agencije za bezbednost saobraćaja RS

- maksimalno obezbeđenje potrebne vidljivosti s puta na železničku prugu i poboljšanje geometrije putno-pružnog prelaza (uklanjanje prepreka u trouglu preglednosti, poboljšanje poprečnog preseka na mestu ukrštaja, bolja drenaža i osvetljenje);
- potpuna rehabilitacija na mestu ukrštaja, strukture drumske saobraćajnice kao i pruge; instalacija filtera i drenaže za odvod i poboljšanje zastorne podloge, prilagođavanje pristupnih saobraćajnica i njihovo proširenje, uklanjanje vegetacije;
- smanjenje brzine prelaska drumskih vozila, kao i smanjenja maksimalne brzine voza gde god to geometrija saobraćajnica zahteva;
- unapređenje uređaja za kontrolu saobraćaja i poboljšanje opreme za detekciju voza;
- saobraćaj kamiona-cisterni koji prevoze opasne materije trebalo bi usmeriti na korišćenje puteva predviđenih za saobraćaj ovih tereta i obavezno korišćenje putno-pružnih prelaza sa aktivnim kontrolnim uređajima. Ukoliko se masovni prevozi u navedenim primerima moraju odvijati preko putno-pružnih prelaza sa pasivnom kontrolom, na takvim mestima treba razmotriti podizanje nivoa obezbeđenja prelaza;
- tehničko osiguranje preostalih putno-pružnih prelaza u nivou;
- promovisati program obrazovanja i sprovođenje mera kroz masovnu edukaciju dece, pešaka i svih ostalih učesnika u drumskom saobraćaju, kako bi se smanjila učestalost opasnih vožnji i upozoravanje vozača drumskih vozila i pešaka na potencijalnu opasnost. Obuku vozača i obrazovanje vršiti kroz posebne programe, a ako je neophodno angažovati i volontere za ovu akciju koja treba da je permanentna.

Ukrštanje železničke infrastrukture sa nekategorisanim putevima izvodi se usmeravanjem tih puteva na najbliži javni put koji se ukršta sa odnosnom železničkom infrastrukturom. Ako to nije moguće treba međusobno povezati nekategorisane puteve i izvesti njihovo ukrštanje sa železničkom infrastrukturom na zajedničkom mestu. Ministar nadležan za poslove saobraćaja, na zahtev upravljača putne infrastrukture, lokalne samouprave, privrednog društva ili drugog pravnog lica ili preduzetnika, uz prethodno pribavljenu saglasnost upravljača železničke infrastrukture, donosi akt, kojim se otvaraju novi, ukidaju ili rekonstruišu postojeći putno-pružni prelazi<sup>12</sup>.

Ukoliko je razmak između dva ukrštanja železničke infrastrukture i puta manji od 2000 m, postupak ukidanja putno-pružnog prelaza sprovodi se u skraćenom postupku.

Cilj analize putno-pružnih prelaza je smanjenje pojave nesreća i nezgoda na ovim opasnim mestima i smanjenje procentualnog učešća nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima u ukupnom broju nesreća i nezgoda. Najveći broj nesreća i nezgoda na mestima ukrštanja puta i železničke pruge svoje uzroke ima u subjektivnim ličnim greškama i propustima učesnika u drumskom saobraćaju. Izuzetno je malo registrovano nesreća i nezgoda za koje je odgovorna železnica.

Uzročnici nastanka nezgoda i nesreća na putno-pružnim prelazima su propusti vozača drumskih vozila koji ili uopšte ne gledaju i ne osmatraju prugu prilikom njenog prelaska, upuštaju se u rizična i po život opasna kretanja, prolazeći između putoprelaznih polubranika, branika i dr. Učesnici u drumskom saobraćaju ne poštuju, u svakoj situaciji i u dovoljnoj meri, svetlosnu signalizaciju, već se odlučuju na prelazak preko pruge, iako su uređaji za obezbeđenje saobraćaja već uključeni. Kao rezultat ovakvih

<sup>12</sup> Čl. 64 Zakona o železnici („Službeni glasnik RS” br. 41 od 31. maja 2018. godine)

odluka, dešava se da, iako ne bude povređenih i usmrćenih u ovim nezgodama i nesrećama, vozila ostaju zaglavljena u koloseku, događaju se sletanja sa koloseka i slično, što opet uzrokuje teže uklanjanje posledica ovakve i slične nezgode i nesreće, u smislu uklanjanja i izvlačenja vozila iz zone infrastrukturnog pojasa, duže obustave drumskog i železničkog saobraćaja i slično.

U napred navedenim situacijama, ponekad se radi o učesnicima u drumskom saobraćaju koji su pod uticajem alkohola i drugih opojnih sredstava. Zbog toga je potrebno voditi sveobuhvatnu akciju na svim društvenim nivoima, na suzbijanju i kažnjavanju ovakvog ponašanja.

Što se tiče izvršnog osoblja u železničkom saobraćaju i železnice, koji mogu u određenom procentu da participiraju u uzroku ili krivci kod pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima, kada već dođe do njih i prilikom utvrđivanja stepena eventualne odgovornosti železnice i železničkih radnika, naročito se treba obratiti pažnja na sledeće:

- kakav je vidik u daljini sa železničke pruge, kao i puta prema dolazećem vozu,
- da li je mašinovođa blagovremeno davao signalni znak br. 67 „Pazi”, prema [Pravilniku o vrstama signala, signalnih oznaka i oznaka na pruzi \(„Sl. glasnik RS” broj 51/20 od 14.04.2020. godine\)](#), koji se daje sirenom vučnog vozila, što se, ukoliko nije izvršeno registrovanje ove radnje na brzinomernom uređaju vozne lokomotive, mora utvrditi po izjavama železničkih radnika-svedoka, ili lica van železnice,
- potrebno je proveriti da li su na pruzi uredno izgrađene, odnosno da li postoje pružne opomenice, shodno [Pravilniku o vrstama signala, signalnih oznaka i oznaka na pruzi \(„Sl. glasnik RS” broj 51/20 od 14.04.2020. godine\)](#),
- da li su saobraćajni znaci na putu bili ispravni i da li je učesnik drumskog saobraćaja mogao blagovremeno uočiti te saobraćajne znake,
- da li je vozač mogao primetiti nailazak voza,
- kako je putno-pružni prelaz obezbeđen,
- kakav je sistem branika i polubranika, da li poluge dobro naležu, da li ima ispravno zvono i da li je branik (polubranik) bio spušten,
- takođe, kod utvrđivanja da li postoji stepen odgovornosti železnice u ovim nesrećama i nezgodama bitno je utvrditi jesu li signalni uređaji, koji označavaju položaj polubranika pravilno funkcionisali, kako bi mašinovođa mogao da kontroliše stanje na putno-pružnom prelazu pred koji nailazi,
- kod prelaza kod kojih se spuštaju branici treba proveriti, ako su branici snabdeveni zvonovnim uređajem, da li ovi uređaji ispravno funkcionišu, da li su branici spušteni na vreme, odnosno najkasnije na 5 minuta pre prolaska očekivanog voza ili pružnog vozila, bilo da se branikom rukuje na licu mesta, bilo na poteg ili električnim putem sa izvesne daljine, shodno čl. 58 tač. 1 [Saobraćajnog pravilnika \(„Službeni glasnik ZJŽ” br. 3/94, 4/94, 5/94, 4/96 i 6/03\)](#),
- ako se nesreća dogodila noću treba utvrditi osvetljenost branika signalnim crvenim svetlom,
- pored ovih postupaka, kod iskliznuća železničkih i drumskih vozila na području putno-pružnog prelaza zbog tehničkih neispravnosti, neophodno je utvrditi u kakvom stanju se

nalaze kontra šine i da li je razmak između šine i kontra šine u granicama propisanih mera, da li u kanalu između šina ima drugih predmeta koji bi mogli izazvati iskliznuće,

- proveriti u kakvom je stanju kolovoz na putno-pružnom prelazu, od kakvog je materijala izrađen kolovoz (asfalt, armirano-betonske ploče, sitna i krupna kamena kocka, gumeni paneli, drveni pragovi i lomljeni kamen) i ima li izdignuća većih iznad propisanih mera koja bi direktno ili indirektno mogla ugroziti bezbednost saobraćaja, ili su uticala na pojavu nesreće ili nezgode,
- i na kraju, kao ništa manje važno, to je: da se obavezno obrati pažnja na činjenicu i da se proverí da li su preduzete mere bezbednog organizovanja železničkog saobraćaja od strane upravljača javnom železničkom infrastrukturom, u slučajevima kvara uređaja putno-pružnih prelaza ili u slučaju kada saobraćaj na tom putno-pružnom prelazu iz bilo kog razloga nije obezbeđen, odnosno da se proverí obezbeđenje putno-pružnog prelaza za takve situacije, shodno odredbama čl. 61 tač. 12, odnosno čl. 63 tač. 5 **Saobraćajnog pravilnika** („Službeni glasnik ZJŽ” br. 3/94, 4/94, 5/94, 4/96 i 6/03).

Za sve navedene slučajeve, permanentno kroz organizaciju i nadzor od najnižih nivoa organizovanja (šefovi stanica, rukovodioci u sekcijama/OC/OJ, procesna unutrašnja kontrola) pa do najvišeg nivoa rukovođenja i kontrole (direktori i menadžment u sektorima eksploatacije, izvršni direktori, generalni direktor i centri za unutrašnju kontrolu) u preduzećima za upravljanje železničkom infrastrukturom i prevozom na železnici, kao i kod upravljača puteva, mora se voditi računa o besprekornom funkcionisanju svih segmenata privrednih društava u cilju očuvanja bezbednosti saobraćaja i minimiziranja opasnosti od pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima, prouzrokovanih nemarom ili nesavesnim radom u ovim segmentima. Naravno, navedene mere se odnose na sva postupanja koja moraju da eliminišu greške kod projektovanja, organizovanja i nadzora pri regulisanju saobraćaja, dok su rizična ponašanja učesnika u drumskom saobraćaju predmet sveobuhvatnih i obimnih istraživanja, čije su preporuke, delom napred navedene i već se uveliko koriste i primenjuju u cilju smanjenja nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima.

## 2.5. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE)

Agencija za bezbednost saobraćaja RS, 2018. Studija „Istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama pružnih prelaza”

<https://www.abs.gov.rs/admin/upload/documents/Istra%20c5%beivanje%20stanja%20bezbednosti%2020saobra%20c4%87aja%20u%20zonama%20pru%20c5%benih%20prelaza.pdf>

Pravilnik o načinu ukrštanja železničke pruge i puta, pešačke ili biciklističke staze, mestu na kojem se može izvesti ukrštanje i merama za osiguranje bezbednog saobraćaja („Službeni glasnik RS”, br. 89/2016);

Pravilnik o prijavljivanju, istraživanju, evidentiranju, statističkom praćenju i objavljivanju podataka o nesrećama i nezgodama („Službeni glasnik RS”, broj 32 od 02.04.2021. godine);

Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji („Službeni glasnik RS”, br. 85/2017 i 14/2021);

- Pravilnik o vrstama signala, signalnih oznaka i oznaka na pruzi („Sl.glasnik RS” broj 51/20 od 14.04.2020. godine);
- Pravilnik o zajedničkim pokazateljima bezbednosti u železničkom saobraćaju („Službeni glasnik RS” broj 25 od 03.04.2019. godine);
- Saobraćajni pravilnik („Službeni glasnik ZJŽ” br. 3/94, 4/94, 5/94, 4/96 i 6/03);
- Uputstvo o postupcima u slučaju nastanka nesreća i nezgoda na području „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. br. 4/2018-986-250 od 09.10. 2018. godine, Službeni glasnik „Ž.S “, broj 52/18;
- Zakon o bezbednosti saobraćaja na putevima („Sl. glasnik RS”, br. 41/2009, 53/2010, 101/2011, 32/2013 - odluka US, 55/2014, 96/2015 - dr. zakon, 9/2016 - odluka US, 24/2018, 41/2018, 41/2018 - dr. zakon, 87/2018, 23/2019 i 128/2020 - dr. zakon);
- Zakon o bezbednosti u železničkom saobraćaju („Službeni glasnik RS”, broj 41 od 31. maja 2018. godine);
- Zakon o putevima („Službeni glasnik RS”, br. 41 od 31. maja 2018, 95 od 8. decembra 2018 - dr. zakon);
- Zakon o železnici („Službeni glasnik RS” br. 41 od 31. maja 2018. godine).

### 3. MODELI ZA PREDVIĐANJE NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA-PREGLED LITERATURE

#### 3.1. UVOD

Većina modela saobraćajnih nesreća razvijena je na osnovu tehnika statističke regresije, odnosno konvencionalne linearne regresije i generalizovane linearne regresije. Od nedavno se, međutim, modeliranje generalizovane linearne regresije gotovo isključivo koristi za razvoj modela predviđanja nesreća (sudara). Različiti regresioni modeli razvijeni su u zavisnosti od različitih karakteristika podataka o nesrećama i nezgodama u različitim situacijama. Kao jedan od najtradicionalnijih i najosnovnijih metoda, Poisson regresioni model je široko korišćen za analizu broja sudara (Jovanis i Li Chang 1986; Miaou i Lum, 1993). Ovi istraživači su pokazali da se ne mogu pretpostaviti standardni uslovi pod kojim je konvencionalna linearna regresija primenljiva (standardne greške modela, konstantna varijansa greške i postojanje linearne veze između varijable odgovora i eksplanatorne varijable) u slučajevima modeliranja saobraćajnih nesreća i nezgoda.

Poisson model distribucije se obično koristi za predviđanje broja nesreća i nezgoda. To je obično prvi izbor prilikom modeliranja saobraćajnih nesreća zbog nenegativne, diskretne i slučajne karakteristike nesreća. Pošto Poisson distribucije imaju samo jedan parametar raspodele, srednja vrednost i varijansa moraju biti iste. Međutim, u većini slučajeva, podaci o nesreći ili nezgodi su prekomerno raspršeni, te je stoga, primenljivost Poisson modela ograničena, što znači, da uprkos tome što imaju značajnu prednost u preciznom modeliranju (Maher i Summersgill, 1996), Poisson modeli su neadekvatni za korišćenje kod prekomerno raspršenih podataka, koji imaju varijansu veću od srednje vrednosti (Maycock i Hall, 1984).

Drugi modeli, uključujući Poisson-lognormalne modele (Miaou i dr., 2005; Lord i Moreno, 2008; Valverde i Jovanis, 2008) i negativni binomni model (NB), odnosno (Poisson-gama) model, (Miaou, 1994; Shankar i dr., 1995; Poch i Mannering, 1996; Maher i Summersgill, 1996; Milton i Mannering, 1998; Chin i Quddus, 2003; El-Basyouny i Sayed, 2006; Donnell i Mason, 2006; Malyshkina i Mannering, 2010) predloženi su za prekomerno raspršene skupove podataka.

Negativni binomni (NB) model je mnogo pogodniji za skupove podataka sa „većom disperzijom, odn. varijansom”, jer model dopušta nejednakost srednje vrednosti i varijanse (Hauer, 2001). Pored toga, uvedena je Conway–Maxwell–Poisson (COM-Poisson) distribucija za modeliranje ili prekomerno ili nedovoljno dispergovanih podataka (Shmueli i dr., 2005; Kadane i dr., 2006; Lord i dr., 2007). Drugi izvor preterane disperzije, pored skrivene nehomogenosti, može da bude velika frekvencija nula u uzorku. U ovoj situaciji, standardni Poisson i NB modeli mogu da budu neodgovarajući. Problem viška nula rešen je Poisson modelom sa viškom nula (ZIP), gde je pretpostavljeno da je raspodela frekvencija mešavina konstante „0” i Poisson raspodele (Lambert Diana, 1992). U slučajevima kada je uzrok prekomerne disperzije, pored viška nula i skrivena nehomogenost uzorka, kao bolji izbor se pokazao negativni binomni model sa viškom nula (ZINB), gde se proces nesreća i nezgoda može uspešno modelirati uz pretpostavku dualnog procesa generisanja podataka. Na osnovu ove pretpostavke, komponente puteva kao što su raskrsnice ili segmenti puteva, kao i u našem slučaju putno-pružni



prelazi, imaju dva stanja, a to su, perfektna, u slučajevima skoro savršene bezbednosti i nebezbedna stanja (Lee i Mannering, 2002).

Pored fenomena prekomerne disperzije, skup podataka o nesrećama može biti povremeno nedispergovan, tj. varijansa je manja od srednje vrednosti. Nedovoljna disperzija može postojati i u skupu podataka sa veoma niskom varijansom uzorka istraživanja (Oh i dr., 2006). Da bi se prevazišli ovi problemi, u kasnijim istraživanjima, negativan binomni model je postao široko prihvaćena tehnika za modelovanje i bio je preporučen od strane mnogih istraživača, npr. Abdel-Aty (2000). Takođe je bio korišćen u drugim kategorijama puta kao urbane arterije od strane Sawalha i Sayed (2001). Bez obzira da li se zaključci procenjuju pomoću klasičnih ili Bajesovih metoda, najčešća probabilistička struktura koja se koristi za modeliranje ove vrste podataka ostaje tradicionalni model *Poisson*-gama (ili negativni binomni model). Podaci o nesrećama prikupljeni za studije o bezbednosti saobraćaja često imaju neobične osobine, da ih karakterišu niske srednje vrednosti uzoraka, a zbog previsokih troškova prikupljanja podataka, male veličine uzoraka.

U poslednjih par godina, pojavilo se više naučnih radova u kojima su rađena istraživanja na temu određivanja modela za procenu rizika od pojave akcidenata na putnim prelazima. Poznata tehnika matematičkog programiranja za merenje efikasnosti kompleksnih entiteta sa raznorodnim ulazima/izlazima, Analiza obavijanja podataka (Data Envelopment Analysis – DEA) softverom DEA-Solver LV8.0. koja omogućuje da se utvrdi da li je jedinica o kojoj se odlučuje (Decision Making Unit - DMU) efikasna ili nije, korišćena je u analizi efikasnost 12 operativnih jedinica koje predstavljaju najbliže gradove u kojima su desile nesreće na putnim prelazima u Republici Srbiji u periodu od 2005. do 2014. godine, sa ciljem smanjenja broja nesreća (Grujić i dr., 2018).

U Republici Srbiji rađeno je još jedno istraživanje (Kasalica i dr., 2020) sa ciljem da se izdvoje potrebni parametri koji kvantifikuju rizik povezan sa železničkim prelazima, gde su analizirani dostupni statistički modeli koji se obično koriste (Poisson, NB, ZIP i ZINB). Ti modeli su dobijeni pomoću postepenog AIC<sup>13</sup>. Potom su dobijeni modeli upoređeni pomoću Vuongovog testa. U navedenom istraživanju (Kasalica i dr., 2020) uvedena je nova mera za rizik - empirijski rizik.

U Bosni i Hercegovini, za osam putnih prelaza na pruzi Šamac – Doboje, je izvršena evaluacija prelaza korišćenjem Novel Integrated Fuzzy MCDM —fuzzy PIPRECIA (*pivot pairwise relative criteria importance assessment*) modela (Blagojević, i dr., 2021), odnosno, ocenjivanje je vršeno pomoću fuzzy MARCOS metode (*measurement of alternatives and ranking according to a compromise solution*). Određen je stepen nivoa bezbednosti putnih prelaza na osnovu određivanja konačnih težinskih vrednosti kriterijuma, kako bi se postiglo održivo upravljanje železničkim saobraćajem.

Istraživanja vršena u Severnoj Karolini (SAD) bazirana su na modelu predviđanja rizika od pojave sudara na putnim prelazima u odnosu na klasu pruge i koloseka (Sharma i dr., 2019). Drugo sveobuhvatno istraživanje koje je rađeno u Floridi (SAD), preporučilo je novi model predviđanja opasnosti, nazvan Formula prioritnog indeksa Floride, za rangiranje/postavljanje prioriteta na putnim prelazima (put/železnica). Formula prioritnog indeksa na Floridi pruža tačnije rangiranje putnih

---

<sup>13</sup> Akaike-ov informacioni kriterijum (AIC) je matematička metoda za procenu koliko model odgovara podacima iz kojih je generisan. U statistikama, AIC se koristi za upoređivanje različitih mogućih modela i utvrđivanje koji od njih najbolje odgovara podacima.

prelaza u poređenju sa alternativnim metodama. Formula prioriternog indeksa Floride procenjuje potencijalnu opasnost datog putnog prelaza na osnovu prosečnog dnevnog saobraćaja drumskih vozila i vozova (Pasha i dr., 2020).

Konkurentski model rizika (Keramati i dr., 2020) je posebna vrsta analize preživljavanja, dizajnirana da pravilno proceni marginalnu verovatnoću ishoda incidencije kada je moguće više uzroka neuspeha. Ova metoda se intenzivno koristi u medicinskim istraživanjima za proučavanje smrti pacijenata koja se može pripisati konkurentskim događajima kao što su kardiovaskularni i nekardiovaskularni uzroci. Modeliranje konkurentskih rizika pojave nesreća na putno-pružnim prelazima, pokazuje sposobnost, da istovremeno identifikuje faktore rizika i marginalnu verovatnoću ozbiljnosti i nastanka sudara. Model je dizajniran da identifikuje i rezimira one faktore koji doprinose verovatnoći rizika pojave nesreća na putnim prelazima u Severnoj Dakoti. Međutim, studija ne sugerise efikasnost protivmera.

Potrebno je naglasiti, da kod primene modela za predviđanja nesreća i nezgoda (sudara) razvijenih u drugim zemljama i područjima nadležnosti i pod različitim uslovima, ne postoji sigurnost da model vredi za lokalno analizirane uslove, što mora biti dodatno ispitano. U 12 zemalja sveta identifikovana su ukupno 22 različita pristupa u analizama i metode za određivanje rizika od pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. Razlike se ogledaju u njihovoj složenosti i pristupu izvođača (akademske organizacije, železničke istraživačke institucije, regulatorna tela itd.). Navedeni pristupi se mogu klasifikovati u četiri glavne grupe zasnovane na različitoj složenosti računskih algoritama (Woods, 2008; Pribyl i Goulias, 2005).

**Prvu grupu** čini korišćenje jednostavnih parametara koji služe kao saveti za izbor nivoa bezbednosti (to nisu metode u pravom smislu te reči, odnosno ne služe za predviđanje rizika), i to u sledećim državama:

- Indija (Jedinične mere vozova i drumskih vozila);
- Japan (Indikator zatvorenog drumskog saobraćaja i Indeks opasnosti za putni prelaz);
- Rusija (Matrica putnih i železničkih intenziteta);
- Španija (Kriterijumi za prelazak);
- Švedska (Faktori za utvrđivanje zaštite na prelazu).

**Drugu grupu** čine jednostavni ponderisani faktori zasnovani na prethodnoj grupi metoda. Osim toga oni ukazuju na relativan doprinos svakog parametra u ukupnom riziku jednostavno definisanog sistema pondera i to su:

- Australija (Sistem ocenjivanja zasnovan na riziku i ALCAM- na eng. *Australian Level Crossing Assessment Model*, odnosno australijski model za ocenjivanje putno-pružnih prelaza);
- Severna Irska (Procena rizika i procena ulaganja);
- Novi Zeland (Produkt procene).

**Treću grupu** čine kompleksni ponderisani faktori u poređenju sa prethodnom grupom metoda, ovde se koriste metode za složenije određivanje težine za parametre i algoritme. Navedeni modeli se koriste u sledećim državama:

- Velika Britanija (Model rizika za sve prelaze, Model za automatizovane prelaze, Model prozora događaja);
- Irska (Model mrežnog rizika, Alat za određivanje prioriternih prelaza);
- Španija (Analiza neuspeha i efekata-FMEA, na *eng. Failure Mode and Effects Analysis*).

**Četvrtu grupu** čine statistički modeli zasnovani na statističkim tehnikama procena težina (empirijski termini) za parametre i navešćemo države u kojim se primenjuju:

- Velika Britanija (GB autoputevi);
- Australija (Procena rizika na putnim prelazima RAAILc model- na *eng. Risk Assessment of Accident and Incident at Level crossings*);
- Kanada (Model predviđanja sudara, *GradeX*);
- Novi Zeland (Model predviđanja nesreća);
- USA (Formule za predviđanje ozbiljnosti nesreće, *GradeDEC.net*).

U nekim zemljama postoji modeliranje rizika na osnovu primena naprednijih tehnika kao što su: npr. empirijske Bajesove metode, *FTA (Fault-Tree-Analysis)*, *ETA (Event-Tree-Analysis)*, analiza ljudskog faktora itd.

Veliki broj postojećih modela bazira se na analizama pojave nesreća i nezgoda koje su se dogodile u prošlosti, kao i praćenju efekata pre i posle sprovođenja određenih mera. Prognoze pojave nesreća i nezgoda su važne radi definisanja strategija, planiranja pojedinih aktivnosti u bezbednosti saobraćaja, vrednovanje procesa rada i sl. U pregledu svetske literature, biće analizirani primeri modela u razvijenim državama i društvima koji koriste podatke o frekvencijama nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. U daljem tekstu ukratko će se navesti neki od modela primenjeni u drugim zemljama, kao i prednosti i uočeni nedostaci modela.

### **3.2. MODELI ZA PREDVIĐANJE NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U SJEDINJENIM AMERIČKIM DRŽAVAMA**

Uzimajući u obzir da se u SAD na skoro 250.000 km železničkih pruga nalazi približno oko 212.000 putno-pružnih prelaza od čega je oko 67.000 aktivnih i oko 145.000 pasivnih prelaza, interesantno je na koji način Biro za javne puteve ([Federal Railroad Administration–FRA](#)) rešava probleme u ovoj oblasti i istražuje pojavu nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. Mnoge metode modeliranja verovatnoće sudara na mestima ukrštanja železničkog i drumskog saobraćaja su razvijene, uglavnom sa ciljem razumevanja koliki je rizik kako za korisnike drumskog, tako i za korisnike železničkog saobraćaja. [Faghri i Demetsky \(1986\)](#) su izvršili kategorizaciju modela za verovatnoću sudara u dve grupe: relativne formule i apsolutne formule. Relativne formule koriste podatke o putno-pružnim prelazima u cilju rangiranja relativnih opasnosti, odnosno određivanja indeksa rizika od opasnosti, za svaki prelaz, tako da se predlog poboljšanja nivoa obezbeđenja putno-pružnih prelaza određuje prema prioritetu od najopasnijih do najmanje opasnih putno-pružnih prelaza. Tu spadaju: Nju Hemšir formula, Peabody-Dimmick formula, formula grada Detroit, Ohajo metod i Nacionalni kooperativni program za istraživanje autoputeva (NCHRP) izveštaj 50.

Apsolutne formule vrše predviđanje broja sudara za koje se očekuje da će se pojaviti na svakom putno-pružnom prelazu u određenom vremenskom periodu i omogućuju procenu broja spasenih života podizanjem nivoa obezbeđenja putno-pružnog prelaza. [Oh i dr. \(2006\)](#) je izvršio poređenje više modela, naglašavajući da razlike između modela mogu biti rezultat mnogih osnovnih faktora koji utiču na bezbednost, kao i slučajna varijacija sudara i kombinacija sa relativno niskim brojem sudara, što predstavlja značajan izazov za modelovanje. Posebno je naglašeno, da već razvijeni modeli imaju malo deskriptivnih mogućnosti zbog ograničenog broja objašnjavajućih promenljivih.

Coleman-Stewart model je razvijen 1976. godine, koristi podatke o drumskom saobraćaju, železničkom saobraćaju i 4 koeficijenta, da odredi očekivani broj sudara na prelazu. Coleman-Stewart je razvio niz jednačina za frekvencije sudara za različite kategorije putno-pružnih prelaza.

Danas je najčešće korišćeni model u SAD - u model za predviđanje nesreća (Department of Transportation - DOT), formula za predviđanje nesreća američkog Ministarstva za transport (USDOT), koja ima ograničenja vezana za složenost formule i njenu smanjenu preciznost modela predviđanja nesreća tokom vremena ([Austin i Carson, 2002](#)). Opšti izraz formule je (3.1.) :

$$a = K \times EI \times MT \times DT \times HP \times MS \times HT \times HL \quad (3.1)$$

gde su:

a = početna vrednost predviđenog broja sudara, godišnji broj sudara na prelazu;

K = konstanta formule;

EI = indeks faktora izloženosti zasnovan na proizvodu drumskog i železničkog saobraćaja;

MT = faktor u zavisnosti od broja glavnih koloseka na prelazu;

DT = faktor u zavisnosti od broja vozova dnevno;

HP = faktor u zavisnosti od toga da li je, ili nije, asfaltirana drumska saobraćajnica;

MS = faktor u odnosu na maksimalnu propisanu brzinu vožnje;

HT = faktor tipa/nivoa značaja puta;

HL = faktor broja kolovoznih traka.

Studija sprovedena u okviru Saveta za istraživanje autoputeva i saobraćaja u Virdžiniji ([Virginia Highway & Transportation Research Council](#)), identifikovala je postojeće modele predviđanja sudara i indeksiranja opasnosti koji se koriste na nacionalnom nivou. Izvršena je procena sposobnosti reprezentativnih modela da koriste dostupne podatke u predviđanju potencijalnih opasnosti i preporučene su metode za buduću upotrebu od strane železničkog i javnog prevoza - Odeljenja za predviđanje potencijalnih nezgoda na mestima ukrštaja železnice i autoputeva ([Faghri i Demetsky, 1986](#)). Izveštaj je identifikovao 13 nacionalno priznatih modela, koji su trenutno ili su prethodno bili uspešno primenjivani od strane više državnih institucija koje se bave istraživanjima bezbednosti saobraćaja i predviđanjem opasnosti od potencijalnih nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. U odnosu na ispitivanje obavljeno u 45 zemalja (SAD) najviše su u upotrebi individualne formule u 32 % zemalja, zatim metod US DOT u 30% zemalja, New Hampshire formula u 22% zemalja, Coleman-Stewart model u 8% i za 8 % zemalja ne postoje podaci. Formula Peabody Dimmick daje procenjeni broj nesreća u petogodišnjem periodu, s obzirom na prosečni godišnji dnevni saobraćaj, prosečan dnevni

saobraćaj vozova i unapred određen koeficijent zaštite. Ipak, kao što su primetili (Austin i Carson, 2002), formula nije u potpunosti primenljiva za sve slučajeve jer su korišćeni podaci za razvoj formule uzorkovani samo za putno-pružne prelaze u ruralnim područjima i regionima, a unapred definisan koeficijent zaštite ne može obuhvatiti najnovija dostignuća u metodama zaštite na putno-pružnim prelazima. Slično kao u Peabody Dimmick formuli, New Hampshire Index koristi prosečni godišnji dnevni saobraćaj, prosečan dnevni saobraćaj vozova i zaštitni faktor za određivanje indeksa opasnosti. Velike vrednosti indeksa opasnosti podrazumevaju veći rizik na putno-pružnom prelazu. New Hampshire Index je modifikovan od strane različitih država u SAD-u, na različite načine, kako bi uključio različite karakteristike saobraćajnice kao što su: broj traka, preglednost, vertikalna preglednost, karakteristike prelaza kao što su tip površine, širina prelaza, ugao ukrštanja i detaljne saobraćajne karakteristike kao što su putnički i teretni vozovi, saobraćaj opasnog tereta, saobraćaj školskog autobusa, brzina voza, brzina na putu, itd. (Faghri i Demetsky, 1986). Ove varijacije korišćenja Nju Hemšir indeksa stvorile su zabrinutost u tačnosti ove formule (Oh i dr., 2006). Indeks NCHRP procenjuje pojavu sudara korišćenjem podataka o obimu dnevnog drumskog i železničkog saobraćaja i koeficijent zaštite, koji je definisan posebno za urbana i ruralna područja i koji nije modernizovan, što je osnovna mana napred pomenutih metoda.

Najveći faktor snage u smislu predviđanja pojave nezgoda i nesreća na putno-pružnim prelazima ima metod US DOT. Izbor je zasnovan na dostupnoj dokumentaciji razvoja svakog od metoda, testiranju, verifikaciji i primeni. Odabir je izvršen između pet formula za evaluaciju (Peabody-Dimmick, NCHRP No. 50, Coleman-Stewart, New Hampshire i US DOT).

Formula USDOT, za predviđanje nesreća i nezgoda u SAD-u ima tri elementa koji rezultiraju: početnim predviđanjem nesreće, drugim predviđanjem nesreće i konačnim predviđanjem sudara. Aktuelna verzija američke DOT formule predviđanja nesreća i nezgoda predstavljena je u Priručniku za prelazak železničkih pruga, revidirano drugo izdanje iz 2007. godine od strane Federalne uprave za javne puteve (Federal Highway Administration - FHWA). Formula USDOT je razvijena korišćenjem podataka o nesrećama i nezgodama na nacionalnim putno-pružnim prelazima od 1981. do 1986. godine. Formula obuhvata različite karakteristike mesta ukrštanja, kao što su maksimalna brzina, broj traka na putu, brzinu na putu i faktor popločavanja puta u predviđanju nesreća. Ove karakteristike putno-pružnih prelaza su značajno povezane sa pojavom nesreća i nezgoda na osnovu podataka iz perioda 1981-1986. O USDOT formuli se raspravlja i kao o poboljšanoj metodi predviđanja u poređenju sa prethodnim metodama, jer ona sadrži više objašnjavajućih faktora bezbednosti putno-pružnih prelaza.

Ipak, kao što su primetili Austin i Carson (2002), formula USDOT ima nedostatke u ponderisanju doprinosa različitih faktora sigurnosti u proceni stope nesreća i nezgoda kao i netačnosti u formulama ažuriranja. Budući da se zasniva na podacima iz celog SAD-a, ne može uvažiti regionalne razlike. Kao rezultat toga, neke države su razvile specijalizovane formule koristeći detaljnije podatke specifične za svaku državu. Sledeći nedostatak formule je to što sadašnja formula ima iste koeficijente karakteristika putno-pružnih prelaza predstavljene još 1980. godine (P. Mengert i dr., 1980), osim za treći element modela, koji se sastoji od normalizujuće konstante koja je faktorisana u modelu neposredno pre dobijanja konačnog predviđanja sudara. Varijable uključene u modele ili njihovi koeficijenti nisu modifikovani od objavljivanja izvorne studije iz 1980. godine i trebalo bi izvršiti

poboljšanja u identifikaciji novih varijabli, različitih efekata faktora koji doprinose u konačnom predviđanju.

Brojne alternative ovim metodama (navedene u uvodnom delu odeljka 3.1. ove disertacije), koje se nalaze u naučnoj literaturi, mogu se baviti nekim od ovih pitanja, ali su podaci intenzivni i njihova primena zahteva značajan napor (prikupljanje, modeliranje, diseminaciju) i njihovo korišćenje ograničava *Department of Transportation-DOT* zbog nedovoljnih resursa i (ili) marginalnih koristi. Kao primer jednog od alternativnih modela napred navedenim formulama za procenu rizika i verovatnoće sudara, urađeno je istraživanje grupe autora (Ullah i dr., 2018) u vezi određivanja modela verovatnoće pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima u Severnoj Dakoti.

U istraživanjima u oblasti bezbednosti saobraćaja na mestima ukrštaja železnice i puteva za velike brzine (highway rail grade crossings) u Severnoj Dakoti (ND) konstatovano je značajno smanjenje pojave nesreća i nezgoda poslednjih nekoliko decenija (Ullah i dr., 2018). Prema statističkim podacima Biroa za transportne statistike (BTS), od 4723 putno-pružna prelaza (HRC)<sup>14</sup> koja postoje u državi ND, 73,6% su javni, 26% su privatni, a 0,4% su pešački prelazi. Preduzeti su brojni naponi da se poboljša bezbednost ovih prelaza, što je rezultiralo smanjenjem pojave nesreća i nezgoda do 82% između 1975. i 2016. godine. Ovaj pad je primećen uprkos povećanju putnih kilometara i obima saobraćaja u oba vida saobraćaja.

Da bi se smanjio broj nesreća i nezgoda i dodatno poboljšala bezbednost, neophodan je pouzdan i ispravan rad vozila, železničkih signala i sigurnosnih karakteristika na HRC-u. Prema izveštaju Istraživačkog odbora o transportu (Lerner i dr., 2002), postoji značajna pogrešna percepcija velikog dela putujuće javnosti u vezi sa opasnostima prilikom prelaska putno-pružnih prelaza i konfuzija u pogledu značenja različitih upozoravajućih znakova. Učesnici u drumskom saobraćaju ponekad pogrešno procenjuju brzinu približavanje voza i iskušavaju sreću ignorišući trepćuća svetla i (ili) zaobilaze spuštene polubranike. Skoro 80% smrtnih slučajeva na HRC-u se dešava kada vozači ignorišu uređaje za upozorenje. Povećanje obrazovnih aktivnosti u vezi sa sigurnošću HRC-a smanjuje broj sudara (Savage, 2006). Prema podacima Odeljenja za saobraćaj ND, indeksi uključeni u proceduru rangiranja HRC-a prema prioritetima podizanja nivoa obezbeđenja, uključuju: obim saobraćaja, dužinu voza, uređaje za upozorenje, broj traka i koloseka, preglednost, stepen prilaza, ugao prelaza, stanje prelaza i poravnanje puteva/staza. Međutim, procedura rangiranja ne uzima u obzir neke druge važne varijable kao što su stanovništvo i vreme. Prema statistikama FRA<sup>15</sup> i Nacionalne uprave za bezbednost saobraćaja na putevima (NHTSA), tri od četiri nesreće na HRC-u se dešavaju u krugu od 25 milja od kuće jedne osobe i 50% nesreća u HRC-u unutar pet milja od kuće jedne osobe, i za ovu populaciju, prema popisnim podacima iz 2010. godine, a koja se nalazi unutar pet milja od posmatranih putno-pružnih prelaza je urađeno istraživanje za period od 2000. do 2016. godine. Za navedeni period su izdvojeni podaci o ukupno 324 nesreće na uzorku od 4723 javnih i privatnih HRC-a. Autori (Ullah i dr., 2018) su pažljivo pregledali i filtrirali podatke koji poseduju moguća odstupanja kao i nedostajuće podatke.

<sup>14</sup> HRC je skraćenica od eng. reči „highway rail grade crossings“, koja označava mesto ukrštaja železničke pruge i autoputa

<sup>15</sup> Federal Railroad Administration–FRA

Međukorelacije između eksplanatornih varijabli su takođe testirane i utvrđeno da nisu ozbiljne. Primenjen je binarni logistički model koji je dat kao:

$$Y = \log \left[ \frac{P_1}{1-P_0} \right] = \alpha + \beta_i X_i \quad (3.2)$$

gde je:

$Y$  = binarna varijabla odgovora;

$\alpha$  = intercept koji treba izračunati;

$\beta_i$  = procenjeni vektor parametara;

$X_i$  = vektor eksplanatornih varijabli.

Verovatnoća nesreće  $\Pi_1$  je data formulom:

$$\Pi_1 = \frac{\exp(\alpha + \beta_i X_i)}{1 + \exp(\alpha + \beta_i X_i)} \quad (3.3)$$

Slično tome, verovatnoća da ne dođe do nesreće  $\Pi_0$  je data formulom:

$$\Pi_0 = \frac{1}{1 + \exp(\alpha + \beta_i X_i)} \quad (3.4)$$

Varijable koje su postale značajne ili doprinose verovatnoći pojave nesreća na putno-pružnim prelazima u ovom istraživanju su: ukupan broj vozova dnevno, maksimalne brzine vozova, broj traka na putu, broj koloseka na mestu ukrštaja, obeležavanje kolovoza, zvona i broj stanovništva unutar blokova od pet milja (Ullah i dr., 2018). Iako Severna Dakota (ND) ima manju populaciju od mnogih drugih država u SAD, zanimljivo je da postoji pozitivan odnos između populacije i verovatnoće pojave nesreća na ovim putno-pružnim prelazima. Rezultati binarnog logit regresionog modela su otkrili sedam značajnih prediktorskih varijabli, uključujući populaciju, u radijusu od pet milja od posmatranih putno-pružnih prelaza (ukrštaj autoputa sa prugom). Ukupan broj vozova po danu, maksimalna tipična brzina voza, broj traka autoputa i broj koloseka na mestu ukrštaja, imaju pozitivne odnose sa verovatnoćom pojave nesreća i nezgoda. Verovatnoća pojave sudara može se smanjiti primenom bezbednih mera ograničenja brzine za vozove u naseljenim područjima. Prisutnost oznaka na kolovozu u obliku zaustavnih linija smanjuje verovatnoću sudara. Prema rezultatima studije, kolovozi na HRC-u treba da budu označeni sa zaustavnim linijama. Takođe je primećeno da se većina nesreća dogodila na prelazima koji se nalaze u naseljenim područjima. Ovo pokazuje da što je veća populacija u blizini HRC-a, veća je verovatnoća pojave nesreća i nezgoda. Svest o opasnostima prelaska preko ovakvih putno-pružnih prelaza, kod ljudi koji žive u njihovoj blizini, treba poboljšati kroz permanentnu edukaciju. Ovo istraživanje ima ograničenje u pogledu broja ljudi koji su povezani sa bilo kojim HRC, u odnosu na pretpostavku u radu da populacija koristi najbliži HRC. Imajući u vidu nalaze studije u vezi sa populacijom, prioritet za poboljšanje nivoa bezbednosti treba dati prelazima koji se nalaze u oblastima sa velikim brojem stanovnika. Iako je ovo istraživanje fokusirano na Severnu Dakotu, buduća istraživanja mogu se proširiti na nacionalni nivo SAD-a ili na druge populacije u drugim zemljama. Pošto veličine bafera imaju korelaciju sa gustinom populacije, bilo bi zanimljivo videti kako osetljivost veličine bafera utiče na pojavu nesreća na HRC-ima u državama koje su više naseljene.

### 3.3. MODELI ZA PREDVIĐANJE NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U FRANCUSKOJ

U Francuskoj se na železničkoj mreži od oko 30.000 km nalazi približno 18.000 putno-pružnih prelaza. Uprkos brojnim preduzetim merama za poboljšanje bezbednosti na putno-pružnim prelazima, Francuska nacionalna železnička kompanija je prebrojala 100 nesreća i nezgoda na ovim mestima, što je dovelo do 25 smrtnih slučajeva u 2014. godini. Ovaj broj je činio pola, od ukupnog broja nesreća godišnje na putno-pružnim prelazima pre deset godina, ali broj nesreća je i dalje je prevelik (SNCF Reseau, 2015). U radovima koji se bave bezbednošću saobraćaja na putno-pružnim prelazima u Francuskoj, za termin putno-pružni prelaz, koristi se oznaka „LX” (railway level crossing) i u daljem objašnjenju modela za predviđanje koristiće se ova oznaka. U Francuskoj postoje četiri tipa LX-eva (SNCF, 2015), a najčešće korišćen tip LX-eva u Francuskoj je, automatizovani LX sa dva polubranika i trepućim svetlima (SAL2) i na kojem je registrovan najveći broj nesreća. U studiji (Ci Liang i dr., 2017) izrađen je preliminarni model predviđanja nesreća i nezgoda, a zatim i poboljšani model zasnovan na preliminarnom modelu. U istraživanje je uključeno 8.332 SAL2 LX-eva. Faktor rizika u regionu je određen opštom učestalošću nesreća i nezgoda na SAL2 u regionu. Faktor nesreća određen je odnosom godišnjeg broja nesreća ili nezgoda u datoj godini i prosečnog broja nesreća ili nezgoda godišnje u periodu od 10 godina.

Za model preliminarne prognoze nesreća i nezgoda, razmatrana su samo tri parametra, a to su: prosečni dnevni železnički saobraćaj, prosečan dnevni drumski saobraćaj i godišnji broj nesreća i nezgoda:

$$\lambda_{10P} = K \times F_{RACC} \times V^a \times T^b \quad (3.5)$$

gde su:

$\lambda_{10P}$  = godišnja učestalost nesreća u periodu od 10 godina;

$K$  = konstanta;

$F_{RACC}$  = faktor nesreća u drumskom saobraćaju;

$V$  = prosečan dnevni obim drumskog saobraćaja;

$T$  = prosečan dnevni obim železničkog saobraćaja;

$F_{RACC}$  je varijabla koja je vremenski zavisna i koja može odražavati varijacije godišnjeg broja nesreća kako vreme prolazi. Konvencionalna formula za trenutni saobraćaj je data kao: frekvencija drumskog saobraćaja  $\times$  frekvencija železničkog saobraćaja (Ci Liang i dr., 2017). Međutim, na osnovu nekih ranijih analiza usvojen je termin „korigovani trenutak”, ili kraće CM (corrected moment), odnosno (3.6):

$$CM = V^a \times T^b \quad (3.6)$$

gde je:

$$b = 1 - a \quad (3.7)$$



i izračunava se tako da je  $a = 0,354$  na osnovu prethodne statističke analize koju je izvršila [SNCF Reseau \(2010\)](#). Stoga, posmatramo ( $V^{0,354} \times T^{0,646}$ ) kao integrišući parametar koji odražava kombinovanu učestalost izloženosti LX-va železničkom i drumskom saobraćaju. Formulu (3.5) možemo napisati u obliku:

$$\lambda_{10P} = K \times RM \quad (3.8)$$

gde je:

$$RM = F_{RACC} \times V^a \times T^b \quad (3.9)$$

Dakle, ovaj model se može smatrati kao linearni model u odnosu na složeni parametar u formuli, koji označavamo sa RM. Za procenu koeficijenta K obično se koristi metoda najmanjih kvadrata (Ordinary Least Squares - OLS). Ovaj preliminarni model je pokazao da, za visoke vrednosti korigovanog momenta, postoji značajno odstupanje između uočene frekvencije nesreća i predviđene frekvencije nesreća na tipu SAL 2 LX-va što su pokazali i rezultati statističkih testova ([Ci Liang i dr., 2017](#)). Zbog svega navedenog razvijen je poboljšani model koji može preciznije predvideti godišnju frekvenciju nesreća i nezgoda na posmatranim putno-pružnim prelazima i koji je uzeo u razmatranje više varijabli koje utiču na pojavu nesreća i nezgoda.

$$\lambda_{10Y} = K \times F_{RACC} \times (V^{0,354} \times T^{0,646}) \times e^{(C_{Profile} \times I_{Profile} + C_{Align} \times I_{Align} + C_{Wid} \times Wid + C_{Leng} \times Leng + C_{RSL} \times RSL + C_{Reg} \times F_{Reg})} \quad (3.10)$$

gde su:

$\lambda_{10Y}$  = godišnja učestalost nesreća u periodu od 10 godina na datom SAL2;

K = konstanta;

$F_{RACC}$  = faktor nesreća u drumskom saobraćaju;

V = prosečan dnevni obim drumskog saobraćaja;

T = prosečan dnevni obim železničkog saobraćaja;

$V^{0,354} \times T^{0,646}$  = korigovan moment;

$C_{Profile}$  i  $I_{Profile}$  = indikatori profila i odgovarajući koeficijent;

$C_{Align}$  i  $I_{Align}$  = indikator poravnanja i njegov odgovarajući koeficijent;

$C_{Wid}$  i  $Wid$  = širina LX-a i odgovarajući koeficijent;

$C_{Leng}$  i  $Leng$  = prelazna dužina ukrštaja i odgovarajući koeficijent;

$C_{RSL}$  i  $RSL$  = odgovarajuće ograničene brzine vozova i odgovarajući koeficijent;

$C_{Reg}$  i  $F_{Reg}$  = faktor regiona i njegov odgovarajući koeficijent

Nakon završetka istraživanja u Francuskoj u prikazanim modelima je dokazano sledeće:

- Dve različite karakteristike železničkog saobraćaja su značajne u pogledu uticaja na frekvenciju nesreća i nezgoda na tipu putno-pružnih prelaza SAL2, a to su: prosečan dnevni železnički saobraćaj i ograničenja brzine na železnici;

- Za drumski saobraćaj postoje dve karakteristike koje imaju značajan uticaj na frekvenciju nesreća i nezgoda na SAL2, a to su: prosečan dnevni drumski saobraćaj i godišnji broj saobraćajnih nesreća. Jedna od najvažnijih karakteristika za procenu godišnje frekvencije nesreća i nezgoda na datom SAL2 je godišnji broj nesreća i nezgoda. Njihov uticaj se verovatno ignorisao u prethodnim studijama vezanim za sigurnosnu analizu LX-eva. U ovom istraživanju (Ci Liang i dr., 2017) jasno je dokazano da su nesreće i nezgode kod LX-eva, pre svega, nesreće i nezgode koje su veoma zavisne od nivoa sigurnosti na putu;
- Četiri karakteristike LX-eva: poravnanje puta, širina LX-eva, dužina prelaza i faktor regiona LX-eva, imaju značajan uticaj na godišnju frekvenciju nesreća i nezgoda na datom SAL2. Važno je podsetiti da vertikalni profil puta nema značajan uticaj. Vođeni su razgovori i konsultacije sa ekspertima SNCF-a, na koji način bi se ova činjenica eksperimentalno objasnila i došlo se do sledećeg zaključka: s jedne strane, „grba” ili „šupljina” u profilu puta izazvala bi veći rizik od nesreće ili nezgoda sa dužim/teškim vozilima (kamioni, autobusi...), sa relativno niskim učestćem; dok sa druge strane, za većinu običnih automobila, takav profil obavezuje učesnike u drumskom saobraćaju da pređu LX-eve sa malim brzinama, čime se smanjuje rizik od nastanka nezgode na LX-u.
- Poboljšani model omogućava predviđanje pojave nesreće sa znatno većom tačnošću i ima odgovarajuću formu u poređenju sa postojećim modelima koji se odnose na predviđanje pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. Iako je razvijen model predviđanja prilagođen pojavi nesreća na tipu prelaza SAL2 LX u Francuskoj, opšta formula modela i metodologija usvojena za uspostavljanje modela i vrednovanje njenog kvaliteta može se primeniti u različitim kontekstima. Proces naučne selekcije u ovom istraživanju osigurao je razmatranje glavnih uticajnih varijabli i isključivanje suvišnih varijabli. U stvari, uticaj varijabli koje se odnose na rizik od nesreće i nezgode na LX treba smatrati važnim u određivanju frekvencije nesreće. Faktor regiona LX-eva, koji može da ukaže na uticaj regionalnog nivoa bezbednosti LX-eva na frekvenciju nesreća, prvobitno se koristi u poboljšanom modelu. U ovoj studiji je predložen efikasniji faktor CM (corrected moment), da zameni konvencionalni saobraćajni trenutak, pojedinačni prosečni dnevni železnički saobraćaj ili pojedinačni prosečni dnevni drumski saobraćaj, kod objašnjenja verovatnoće pojave nesreća i nezgoda na LX-evima. Značajan uticaj saobraćajnih nesreća, skoro ignorisan u prethodnim studijama, dobro je razmotren u ovoj studiji.

U budućim radovima, predlaže se uspostavljanje Bajesovog (*Bayesian*) modela rizika za kvantifikaciju uzročnih veza između parametara koji utiču na rizik povezan sa pojavom nesreća i nezgoda na LX-evima i procena njihovog uticaja na nivo sigurnosti LX-eva. Pored toga, potrebno je istražiti i efikasnost različitih tehničkih rešenja, na osnovu nekih eksperimenata, koji su već sprovedeni kroz ovo istraživanje na određenom broju putno-pružnih prelaza / LX-eva.

U toku 2018. godine ista grupa autora (Liang i dr., 2018) koja je vršila napred navedena istraživanja u Francuskoj i koja je izradila preliminaran i poboljšan model predviđanja nesreća i nezgoda na posmatranim SAL2 LX-vima sa potpuno istom bazom podataka, nastavila je istraživanje i analizu rizika na putno-pružnim prelazima uz korišćenje Bajesovih mreža (BNs). Posebno su uvedena kauzalna

strukturna ograničenja kako bi se uspostavio BN model rizika u svrhu kombinovanja empirijskih znanja i statističkih podataka i na taj način omogućila identifikacija efektivne uzročnosti i izbegle neprikladne strukturne veze. Takođe, napredni i obrnuti zaključci zasnovani na određivanju rizika korišćenjem BN modela, su izvedeni kako bi se predvidela pojava nesreća i nezgoda na LX-evima i kvantifikovao stepen doprinosa različitih faktora i uticaja, u cilju određivanja rizičnijih faktora. Pored toga, izvršena je analiza uticaja jačine modela kako bi se ispitala snaga uticaja različitih uzročnih faktora na pojavu nesreća i nezgoda na LX-evima. Tokom poslednje decenije, Bajesova mreža (BN), sa formalnim rasuđivanjem i korišćenjem uslovnih verovatnoća, sve se više koristi za analizu rizika kritičnih sistema bezbednosti ili velikih i složenih dinamičkih sistema (Chemweno i dr., 2015).

Na primer, Bouillaut i dr., (2013) je raspravljao o razvoju alata za odlučivanje koji su realizovani hijerarhijskim dinamičkim modelom (Dynamic BNs), koji je posvećen održavanju linija metroa u Parizu. U tom radu je detaljno je opisan proces smanjenja značaja pruge, kao i različiti učesnici u dijagnostici (uređaji i osoblje) i odluke koje se odnose na aktivnosti održavanja.

Langseth i Portinale (2007) razgovarali su o primenljivosti modela BN za analizu pouzdanosti i ponudili primenu aplikacije BNs za preventivno održavanje.

Za sve interesantne karakteristike koje karakterišu BN, autori u Francuskoj usvojili su ovu notaciju u svom istraživanju kako bi se bavili analizom rizika na LX-evima i kako bi identifikovali tehnička rešenja za poboljšanje sigurnosti i bezbednosti na LX-evima.

Primena Bajesovih mreža (BNs), odnosno BN modela rizika, u istraživanju grupe autora (Liang et al., 2017), ukazala je da se može proceniti verovatnoća nesreće. Pokazano je da neprikladno ponašanje vozača (nepoštovanje propisa i procedura i nepropisno zaobilaženje uređaja putno-pružnih prelaza) utiče više (0,7099) na pojavu nesreća na LX-evima, nego statički faktori (0,2899). Među statičkim faktorima, faktor rizika regiona (0,0010) ima najveći uticaj na pojavu nesreća na LX-evima, dok profil (0,0002) ima najmanji uticaj na pojavu LX nesreća. S druge strane, nepropisno zaobilaženje uređaja putno-pružnih prelaza (0,1143) više utiče na pojavu nesreća na LX-evima uzrokovanu neprikladnim ponašanjem vozača, u poređenju sa uticajem „zastoja na LX-evima“ (0,0137). Preporuka ovog istraživanja je da je potrebno obratiti više pažnje na nepropisna zaobilaženja uređaja putno-pružnih prelaza, kada se budu razmatrala tehnička rešenja za poboljšanje sigurnosti na putno-pružnim prelazima.

### **3.4. MODELI ZA PREDVIĐANJE NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U MAĐARSKOJ**

Dužina železničke mreže u Mađarskoj je 7.700 km, sa oko 5.800 putno-pružnih prelaza u nivou. U skorije vreme, preduzeto je nekoliko sigurnosnih mera: na putno-pružnim prelazima sa automatskim otvaranjem dodati su polubranici, montirani su LED saobraćajni signali na prelaze velikog saobraćajnog intenziteta i automatski branici su ubačeni na mestima gde su vršena obezbeđenja saobraćaja manuelno. I dalje je ostalo pasivno oko polovine putno-pružnih prelaza, odnosno, bez aktivne zaštite, ali sa odgovarajućim saobraćajnim znacima.

Slično generalnom smanjenju u broju nezgoda na putevima, broj nezgoda na železničkim prelazima je više nego prepolovljen od 1990. godine. Ipak, generalni trend opadanja je prekinut 2014. godine, kad je 10 osoba poginulo i 21 osoba je teže povređena na putno-pružnim prelazima.

U Mađarskoj, tehničke smernice definišu metod za rangiranje bezbednosti putno-pružnih prelaza. Sistem tačaka je postavljen 1993. uzimajući u obzir prethodne nezgode, izloženost saobraćaju, tip prelaza, maksimalne brzine na železnici i putevima, geometriju, saobraćajne znakove i oznake i ostale faktore rizika. Trenutni pristup koji se koristi za rangiranje crnih tačaka je konvencionalan i postoji potreba za sofisticiranijim i statistički opravdanim metodologijama.

U istraživanju koje je izvršeno od strane grupe istraživača (Borsos i dr., 2016), korišćeni su podaci o nezgodama za pet godina (2010-2014), PGDS za železnički i drumski saobraćaj, ograničenja brzine i prikupljeni su podaci u vezi sa geometrijom (širina puta, kontrolni uređaji, ugao prelaza, poravnanje, broj traka, preglednost). Pošto je utvrđeno da su podaci o nesrećama značajno prekomerno dispergovani u odnosu na njegovu srednju vrednost, upotrebljen je pristup generalizovanog linearnog modeliranja (GLM) sa negativnom strukturom binomne greške. Modelovanje je urađeno u statističkom softveru R (R, 2013). Jednačina za procenu data je izrazom (3.11):

$$E(Y) = e^{\alpha_0} * AADT_{road}^{\alpha_1} * AADT_{rail}^{\alpha_2} * e^{\sum_{j=1}^m \beta_j x_j} \quad (3.11)$$

Gde su:

$E(Y)$  = Procenjeni broj nezgoda/5 godina.

$AADT_{road}^{\alpha_1}$  = Prosečan godišnji dnevni drumski saobraćaj (vozila/dan).

$AADT_{rail}^{\alpha_2}$  = Prosečan godišnji dnevni železnički saobraćaj (vozova/dan).

$\alpha_0$  = konstanta.

$\alpha_1$  = parametar koji opisuje odnos između obima drumskog saobraćaja i broja nezgoda.

$\alpha_2$  = parametar koji opisuje odnos između obima železničkog saobraćaja i broja nezgoda.

$x_j$  = bilo koja od  $m$  dodatnih promenljivih.

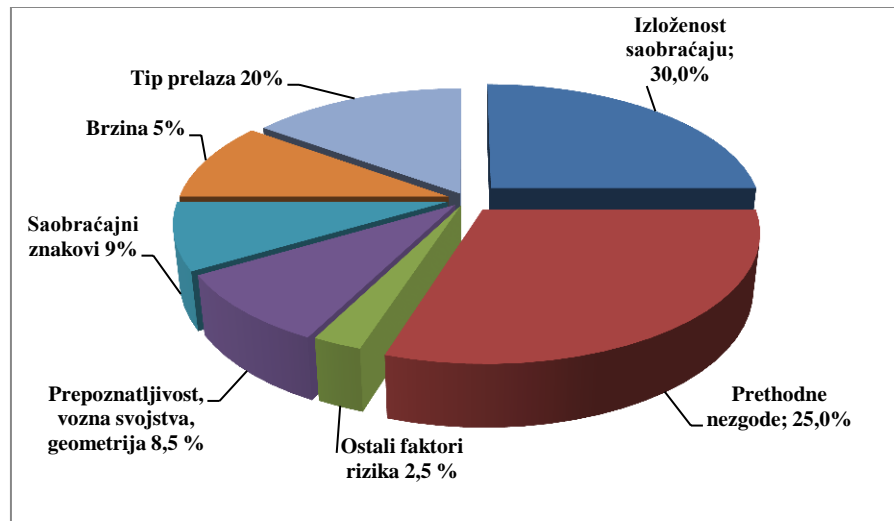
$\beta_j$  = procenjeni koeficijenti.

PGDS je uključen sa eksponentom, jer se zna da ima nelinearnu vezu sa pojavom nezgode. Svaka varijabla je uneta u model samostalno da bi se videlo koje značajno utiču na učestalost nezgoda. Rezultati su dali procenu uticaja objašnjavajućih faktora na sigurnost prelaza preko železničke pruge.

Metod rangiranje bezbednosti na putno-pružnim prelazima je bio predmet kritikovanja prethodnih godina, jer se podaci ne ažuriraju redovno i nije bilo statističkih dokaza iza tvrdnji.

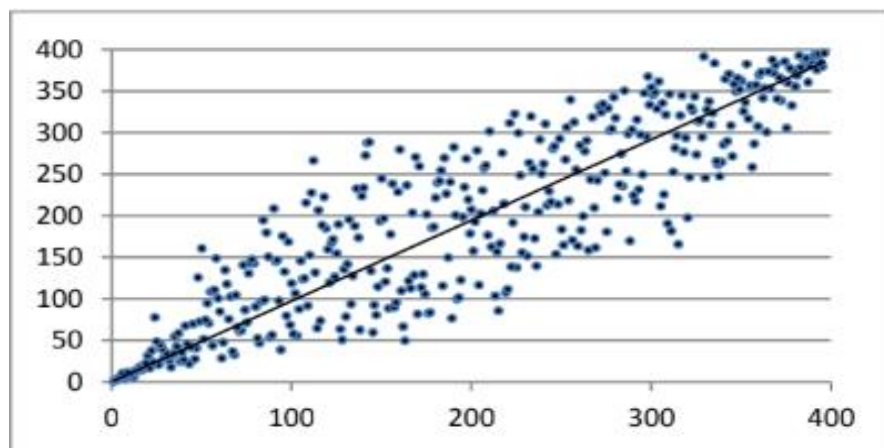
Modelovanje korišćeno u istraživanju (Borsos i dr., 2016) dalo je neku statističku osnovu da se promeni značaj individualnih faktora. Dok su obim drumskog i železničkog saobraćaja značajne promenljive, njihova važnost je porasla sa 25% na 30%, a važnost tipa prelaza je porasla do 20%. Dalje, razlike između individualnih tipova prelaza u okviru ovih 20% prilagođeni su rezultatima modela.

Kako je brzina pokazala samo marginalne efekte, njena važnost je opala za 5% (slika 3.1).



**Slika 3.1** - Težina komponenti za rangiranje iz 2015. godine <sup>16</sup>

Kao test, 400 najviše rangiranih prelaza prema „potpunom” metodu su procenjeni pojednostavljenim metodom (slika 3.2).



**Slika 3.2-** Rangiranje 400 prelaza u nivou prema detaljnim parametrima (horizontalna skala) i smanjenim parametrima (vertikalna skala) <sup>17</sup>

Na slici 3.2 se vidi da nema većih odstupanja i da postoji razumna korelacija između rangiranja, posebno uzimajući u obzir prvih 50 prelaza koji su rangirani potpunim, a onda ocenjeni pojednostavljenim modelom. Zbog toga je pojednostavljen model uključen u nove tehničke smernice. Zbog manje količine podataka, rangiranje će se vršiti redovno i imaće značajan uticaj na odluke o bezbednosti saobraćaja.

<sup>16</sup> Preuzeto iz rada Borsos, A., Gabor, M., Koren, C. (2016). Safety Ranking of Railway Crossings in Hungary. *Transportation Research Procedia, Volume 14*, 2111-2120 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.226>

<sup>17</sup> Preuzeto iz rada Borsos, A., Gabor, M., Koren, C. (2016). Safety Ranking of Railway Crossings in Hungary. *Transportation Research Procedia, Volume 14*, 2111-2120 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.226>

Ova otkrića mogu pokazati stanje stvari na železničkim prelazima u Mađarskoj, ali nisu reprezentativna za prelaze preko železničke pruge drugih država. Npr., zaključeno je da ugao prelaza, prepreke na trouglu preglednosti prilaza i prepreke na trouglu preglednosti prelaza, nisu značajni predskazivači nesreća i nezgoda. Navedeni rezultati možda mogu biti tačni za Mađarsku, ali možda neće biti tačni u drugim državama, stoga nisu primenljivi na putno-pružnim prelazima u različitim regionima.

### 3.5. REFERENCE

- Abdel-Aty, M.A., Radwan, A.E. (2000). Modeling traffic accident occurrence and involvement. *Accident Analysis and Prevention* 32(5), 633–642. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(99\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00094-9)
- Aguero-Valverde, J., Jovanis, P. (2008) Analysis of Road Crash Frequency with Spatial Models. *Transportation Research Record*, 2061, 55-63. <https://doi.org/10.3141/2061-07>
- Austin, R.D., Carson J.L.(2002) .An alternative accident prediction model for highway-rail interfaces. *Accident Analysis and Prevention* 34(1), 31–42; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00100-7](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00100-7)
- Blagojević, A., Kasalica, S., Stević, Ž., Tričković, G., and Pavelkić, V. (2021). Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model Sustainability 2021, 13, 832. <https://doi.org/10.3390/su13020832>
- Borsos, A., Gabor, M., Koren, C. (2016). Safety Ranking of Railway Crossings in Hungary. *Transportation Research Procedia, Volume 14*, 2111-2120 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.226>
- Bouillaut, L., Francois, O., Dubois, S. (2013). A bayesian network to evaluate underground rails maintenance strategies in an automation context. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 227 (4), 411–424. <https://doi.org/10.1177/2F1748006X13481306>
- Chemweno, P ., Pintelon, L ., Van Horenbeek, A ., and Muchiri, P . (2015). Development of a risk assessment selection methodology for asset maintenance decision making: An analytic network process (anp) approach. *International Journal of Production Economics*, 170, 663–676. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.03.017>
- Chin, H., Quddus MA. (2003). Applying the random effect negative binomial model to examine traffic accident occurrence at signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention* 35 (2): 253-259; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00003-9)
- Donnell, E.T., Mason, J.M. Jr.(2006). Predicting the Frequency of Median Barrier Crashes on Pennsylvania Interstate Highways. *Accident, Analysis and Prevention*, Vol.38. No. 3, 590-599 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.12.011>
- El-Basyouny, K. , Sayed, T. (2006) Comparison of Two Negative Binomial Regression Techniques in 3 Developing Accident Prediction Models. *Transportation Research Record*, 1950, issue: 1, 9-16. <https://doi.org/10.1177/0361198106195000102>

- Faghry, A., Demetsky, M.J. (1986). Comparasion of Formulae for predicting Rail-Highway crossing hazards. Transportation research record, 1114; <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1114/1114-016.pdf>
- Federal Highway Administration – FHWA; <https://safety.fhwa.dot.gov/hsip/xings/>
- Federal Railroad Administration–FRA; <https://www.fra.dot.gov/>
- Grujić S., Popović M., Savić G., Pamučar D., (2018). Safety assessment of railway crossings in Serbia using DEA method, XLV Symposium on Operational Research, SYM-OP-IS 2018 Zlatibor, Serbia 16-19 September 2018. [http://cea.fon.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2019/01/Grujic\\_Popovic\\_Savic\\_Pamucar-SymOpIs2018final.pdf](http://cea.fon.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2019/01/Grujic_Popovic_Savic_Pamucar-SymOpIs2018final.pdf)
- Hauer, E. (2001). Overdispersion in modelling accidents on road sections and in Empirical Bayes estimation. Accident, Analysis and Prevention, 33(6), 799–808; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00094-4)
- Ihsan, U.K., Lee, E.S., Muhammad , A.K.(2018). Developing a Highway Rail Grade Crossing Accident Probability Prediction Model: A North Dakota Case Study. Safety 2018, 4 (2), 22; <https://doi.org/10.3390/safety4020022>
- Jovanis, P. P., Chang, H. (1986). Modeling the relationship of accidents to miles traveled; Transportation Research Record, No. 1068, TRB, National Research Council; [http://www.honolulutraffic.com/Admin\\_Record/Administrative\\_Record\\_rev\\_2.28.12/Administrative\\_Record\\_Volumes\\_1-11/Vol002\\_AR00028614/AR00029621.pdf](http://www.honolulutraffic.com/Admin_Record/Administrative_Record_rev_2.28.12/Administrative_Record_Volumes_1-11/Vol002_AR00028614/AR00029621.pdf)
- Kadane, J. B., Galit, S., Minka, T.P., Borlex, S., Boatwright, P. (2006). Conjugate Analysis of the Conway-Maxwell-Poisson Distribution. Bayesian Analysis, Volume 1, Number 2, 363-374; [DOI: 10.1214/06-BA113](https://doi.org/10.1214/06-BA113)
- Kasalica, S. ,Obradović M., Blagojević, A., Jeremić, D., Vuković, M., (2020) Models for ranking railway crossings for safety improvement. Oper. Res. Eng. Sci. Theory Appl. 2020, 3, 85–100 <https://doi.org/10.31181/oresta20303085k>
- Keramati, A., Lu,P. , Zhou, X. and Tolliver, D. (2020). A Simultaneous Safety Analysis of Crash Frequency and Severity for Highway-Rail Grade Crossings: The Competing Risks Method. Journal of Advanced Transportation, vol. 2020, Article ID 8878911, 13, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8878911>
- Lambert, D. (1992). Zero-Inflated Poisson Regression, with an Application to Defects in Manufacturing, American Statistical Association and the American Society for Quality Control, Vol. 34, No. 1, 11-14, 1992; [DOI: 10.1080/00401706.1992.10485228](https://doi.org/10.1080/00401706.1992.10485228)
- Langseth, H., Portinale,L. (2007).Bayesian networks in reliability. Reliability Engineering &System Safety, 92 (1), 92–108. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.037>
- Lee, J. , Mannering, F. (2002). Impact of Roadside Features on the Frequency and Severity of Run-Off-Roadway Accidents: An Empirical Analysis. Accident Analysis and Prevention, 41, 798-808; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(01\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00009-4)
- Lerner, N.D.; Llaneras, R.E.; McGree, H.W.; Stephens, D.E. (2002).Traffic Control Devices for Passive Railroad-Highway Grade Crossings; National Cooperative Highway Research Program; Report 470. Transportation Research Board:Washington, DC, USA, 2002; <http://worldcat.org/isbn/0309067510>
- Liang, Ci., Ghazel, M., Cazier , O., Koursi E.M.E. (2017). Developing accident prediction model for

- railway level crossings. *Safety Science*, Volume 101, January 2018, 48-59; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.08.013>
- Liang, Ci., Ghazel, M., Cazier, O. (2018) Using Bayesian Networks for the Purpose of Risk Analysis at Railway Level Crossings. *IFAC-Papers OnLine* Volume 51, Issue 9, 2018, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.024>
- Lord, D., Guikema S. D., Geedipally, S.R. (2008). Application of the Conway–Maxwell–Poisson generalized linear model for analyzing motor vehicle crashes. *Accident, Analysis and Prevention*, Volume 40, Issue 3, 1123-1134; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.12.003>
- Lord, D., Miranda-Moreno, L.F. (2008); Effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter of Poisson-gamma models for modeling motor vehicle crashes. A Bayesian perspective. *Safety Science*, 46, 751-770; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.03.005>
- Maher, M.J., Summersgill, I. A. (1996). Comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. *Accident Analysis and Prevention* 28, 281-296; [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(95\)00059-3](https://doi.org/10.1016/0001-4575(95)00059-3)
- Malyschkina, N.V., Mannering, F. (2010). Empirical assessment of the impact of highway design exceptions on the frequency and severity of vehicle accidents. *Accident Analysis and Prevention* 42 (1): 131-139 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.07.013>
- Maycock, G., R. D. HALL (1984). *Accidents at 4-arm roundabouts*. TRL Laboratory Report LR 1120. Crowthorne: book
- Miaou, S.P., Lum, H. (1993). Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationship. *Accident Analysis and Prevention* 25, 689–709; [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(93\)90034-T](https://doi.org/10.1016/0001-4575(93)90034-T)
- Miaou, S.P. (1994). The relationship between truck accidents and geometric design of road sections: Poisson versus negative binomial regressions. *Accident Analysis and Prevention* 26 (4), 471–482. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)90038-8)
- Miaou, S.-P., Bligh, R. P., Lord, D. (2005). Developing median barrier installation guidelines: A benefit/cost analysis using Texas data. *Transportation Research Record*, 1904, 2-19; <https://doi.org/10.1177/2F0361198105190400101>
- Milton, J., Mannering, F. (1998); The relationship among highway geometrics, traffic-related elements and motor-vehicle accident frequencies. *Transportation* November 1998, Volume 25, Issue 4, 395–413; <https://doi.org/10.1023/A:1005095725001>
- Oh, J., Washington, S.P., Nama, D.(2006). Accident prediction model for railway-highway interfaces. *Accident Analysis and Prevention* 38(2), 346–356; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.10.004>
- Pasha, J., Dulebenets, M.A., Abioye, O. F., Kavosi, M., Moses, R., Sobanjo, J., Ozguven, E. E. (2020). A Comprehensive Assessment of the Existing Accident and Hazard Prediction Models for the Highway-Rail Grade Crossings in the State of Florida. *Sustainability* 2020, 12 (10), 4291; <https://doi.org/10.3390/su12104291>
- Poch, M., Mannering, F. (1996). Negative Binomial Analysis of Intersection Accident Frequencies. *Journal of Transportation Engineering* *Vol. 122, Issue 2 (March 1996)*; <https://doi.org/10.1061/28ASCE%290733-947X%281996%29122%3A2%28105%29>



- Pribyl, O. and K. G. Goulias (2005). Simulation of daily activity patterns. In H. J. P. Timmermans (Ed.). *Progress in Activity-based Analysis*, Oxford, Pergamon, 43-66; <https://doi.org/10.1177/0361198105192600116>
- P. Mengert, P., Farr E.H. (1980). Rail-Highway crossing accident prediction research results-FY80. Transportation Systems Center Cambridge MA 02142
- R Core Team 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0; <http://www.r-project.org/>
- Savage, I. (2006). Does Public Education Improve Rail-Highway Crossing Safety? *Accident Analysis and Prevention* 38(2), 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.10.001>
- Sawalha, Z., Sayed, T.(2001). Evaluating Safety of Urban Arterial Roadways. *Journal of Transportation Engineering*, 127, 151–158. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2001\)127:2\(151\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:2(151))
- Shankar, V., Mannering, F., Barfield, W. (1996); Statistical analysis of accident severity on rural freeways. *Accident Analysis and Prevention* 28 (3), 391–401; [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(96\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0001-4575(96)00009-7)
- Shmueli, G., Minka, T. P., Kadane, J. B., Borle, S. , Boatwright, P. (2005). A useful distribution for fitting discrete data: revival of the Conway-Maxwell-Poisson distribution. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C*, 54, 127–142. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2005.00474.x>
- SNCF Réseau (2015), 8th National Conference of Road Safety at Level Crossings (8ème Journée Nationale de Sécurité Routière aux Passages à Niveau), France; <http://www.sncf-reseau.fr/fr/dossier-de-presse-8eme-journee-nationale-de-securite-routiere-aux-passages-a-niveau>
- SNCF Réseau, 2010. Statistical Analysis of Accidents at LXs. France.
- Soumya Sharma,S., Pulugurtha S. S. Modeling Crash Risk at Rail-Highway Grade Crossings by Track Class (2019). *Journal of Transportation Technologies* Vol.9 No.3, July 2019 [10.4236/jtts.2019.93016](https://doi.org/10.4236/jtts.2019.93016)
- Virginia Highway & Transportation Research Council  
[https://www.researchgate.net/publication/237571880\\_Virginia\\_Transportation\\_Research\\_Council](https://www.researchgate.net/publication/237571880_Virginia_Transportation_Research_Council)
- Woods, M.D., Slovak, R., Schnieder, E. (2008). Safer European level crossing appraisal and technology (SELCAT)-D3 report on risk modeling techniques for level crossing risk and system safety evaluation. Rail Safety Stand. Board (RSSB) 66–67.

## 4. SISTEMI MASOVNOG OPSLUŽIVANJA (SMO), TEORIJSKE OSNOVE

### 4.1. PREGLED RASPODELA I STOHAŠTIČKIH (SLUČAJNIH) PROCESA

Obzirom da se u ovoj disertaciji posmatra sistem masovnog opsluživanja, gde su pristizanja učesnika u drumskom i železničkom saobraćaju na putno-pružni prelaz *Poisson*-ovi procesi, a vremena opsluživanja eksponencijalna, poznavanje osnovnih pojmova teorije verovatnoće i stohastičkih, odnosno slučajnih procesa, je neophodno za razumevanje ovog rada i u daljem izlaganju biće detaljno objašnjeni.

#### 4.1.1. Poasonova, eksponencijalna i Erlangova raspodela

Poasonova raspodela je granični slučaj binomne raspodele pod uslovom da je broj eksperimenata  $n$  veliki, a verovatnoća  $p$  pojave događaja  $A$  u svakom pojedinačnom eksperimentu (Bernulijevog tipa) mala (Vukadinović i dr., 2004).

Poasonova (Simeon Denis Poisson)<sup>18</sup> teorema predstavlja genezu ove raspodele. Ova teorema dokazuje da, kao što je pretnodno navedeno, Poasonova raspodela nastaje kao granični slučaj binomne raspodele kada broj ponavljanja eksperimenta neograničeno raste ( $n \rightarrow \infty$ ), verovatnoća  $p$  teži nuli ( $p \rightarrow 0$ ), dok njihov proizvod ostaje konstantan ( $n \cdot p = \lambda = const.$ )

Poasonova raspodela je diskretna raspodela slučajne promenljive sa parametrom  $\lambda$ . U slučaju da slučajna promenljiva  $X$  ima Poasonovu raspodelu, verovatnoća da će se slučajna promenljiva realizovati  $k$  puta prikazana je formulom (4.1).

Poasonova raspodela je pogodna za modeliranje prebrojivih podataka. Kako se  $\lambda$  povećava, Poasonova raspodela se približava normalnoj.

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda} \quad \text{za } k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \dots \quad i \quad \lambda > 0 \quad (4.1)$$

Matematičko očekivanje slučajne promenljive  $X$  jednako je :

$$M(X) = \lambda \quad (4.2)$$

Disperzija slučajne promenljive  $X$  jednaka je :

$$D(X) = \lambda \quad (4.3)$$

Koeficijenti asimetrije i ekscesa su (4. 4)

$$K_A = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad K_E = \frac{1}{\lambda} \quad (4.4)$$

<sup>18</sup> Poasonova raspodela je dobila ime po francuskom matematičaru Simonu Denisu Poasonu (1781–1840), koji je prvi uveo ovu raspodelu i objavio je zajedno sa njegovom teorijom verovatnoće 1837. godine u delu pod nazivom „Istraživanje o verovatnoći presuda u krivičnim i građanskim pitanjima”.

Još u prvim istraživanjima saobraćajnih tokova ustanovljen je značaj Poasonove raspodele (Adams, 1936). Termin „slobodan tok” (free flow) je prvi put u radu upotrebio *Willian Frederic Adams*. Posebno je apostrofirana međusobna nezavisnost u trajanju intervala između nailazaka uzastopnih vozila. Nezavisnost između vozila je u skladu sa osobinom „bezposledičnosti” rezultirala Poasonovom raspodelom.

Matematičko očekivanje i varijansa slučajne promenljive su identične, iznose  $\lambda$ . Ako se pojava slučajnih događaja realizuje u vremenu, na ordinaran način, tj. da se može izabrati infinitezimalni interval u kojem se realizovao najviše jedan ili nijedan događaj i ako je u svakom vremenskom intervalu većem od ordinarnog, interval raspodela broja događaja opisan Poasonovom raspodelom, potok događaja nazivamo Poasonovim potokom.

Poasonov potok događaja poseduje osobinu stabilnosti: proizvoljan broj nezavisnih Poasonovih potoka proizvoljnog intenziteta  $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_n(t)$  daje Poasonov potok sa intenzitetom

$\lambda_j(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_n(t)$ . Ovu osobinu Poasonove raspodele je ustanovio i dokazao ruski matematičar Dmitry Raikov 1937. godine.

Neka se na proizvoljnom vremenskom intervalu dužine  $\tau$ , istovremeno realizuje  $n$  nezavisnih Poasonovih potoka. Neka se u vremenu počev od trenutka  $t$  do trenutka  $(t+\tau)$  u potoku  $j$  realizovalo  $X_j$  događaja, pri čemu je  $j \in [1, n]$ . Kako su potoci Poasonovi, slučajna promenljiva  $X_j$  ima Poasonovu raspodelu sa matematičkim očekivanjem:

$$a_j = a_j(t, \tau) = \int_t^{t+\tau} \lambda_j(t) dt \quad (4.5)$$

gde je  $\lambda_j(t)$  intenzitet  $j$ -tog potoka. Karakteristična funkcija slučajne promenljive  $X_j$  koja ima Poasonovu raspodelu sa parametrima  $a_j(t, \tau)$  jednaka je:

$$k_{X_j}(x) = M[e^{ixX_j}] = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(a_j)^m}{m!} e^{-a_j} e^{ixm} = e^{-a_j} (1 - e^{ix}) \quad (4.6)$$

Da bi smo dokazali da se u rezultatu sabiranja  $n$  nezavisnih potoka Poasonovog tipa dobija Poasonov potok, dovoljno je dokazati da slučajna promenljiva

$$X = \sum_{j=1}^n X_j \quad (4.7)$$

Ima Poasonovu raspodelu sa parametrom:

$$a = \int_t^{t+\tau} \lambda(t) dt = \int_t^{t+\tau} \sum_{j=1}^n \lambda_j(t) dt = \sum_{j=1}^n a_j \quad (4.8)$$

Kako su potoci nezavisni, to su odgovarajuće slučajne promenljive  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , nezavisne. Karakteristična funkcija slučajne promenljive je jednaka:

$$k_X(x) = \prod_{j=1}^n k_{X_j}(x) = \prod_{j=1}^n e^{-a_j} (1 - e^{ix}) = e^{-a_1} (1 - e^{ix}) \dots e^{-a_n} (1 - e^{ix}) = e^{-\sum_{j=1}^n a_j} (1 - e^{ix}) \quad (4.9)$$

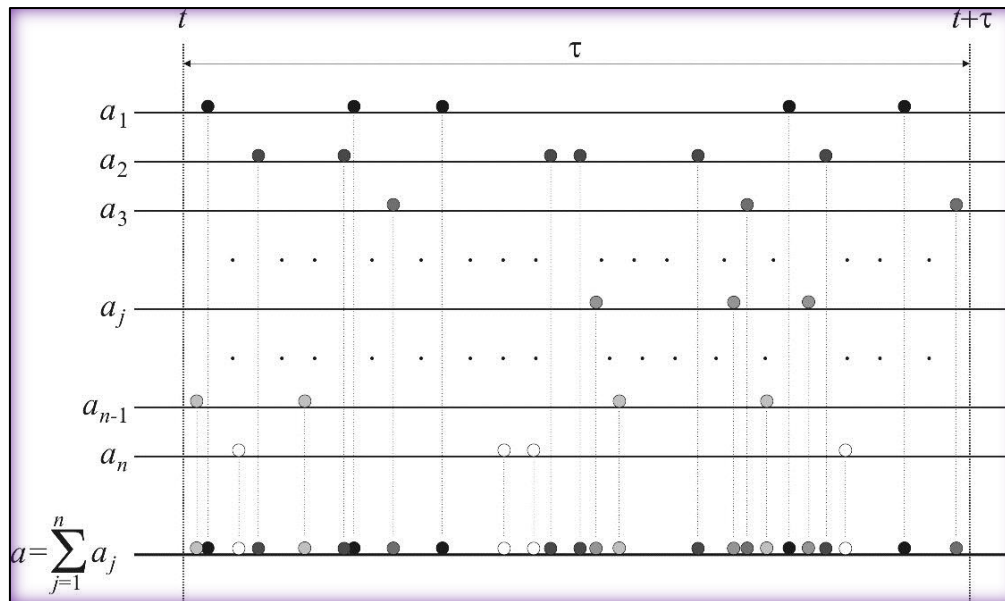
Kako je:

$$a = \sum_{j=1}^n a_j \Leftrightarrow e^{\sum_{j=1}^n a_j(1-e^{ix})} = e^{a(1-e^{ix})} \quad (4.10)$$

Dokazujemo da je zbir proizvoljnih Poasonovih potoka Poasonov potok. Generalni koncept ove teoreme prikazan je na slici 4.1. Zbog značaja i ove osobenosti, ova teorema je potvrđena 1964. godine (Richard von Mises, 1964).

Poznata je činjenica da Poasonov potok ima jednu izuzetnu osobinu: u stacionarnom Poasonovom potoku kod kojeg je intenzitet konstantan, vreme između dva događaja ima **eksponencijalnu raspodelu**. U stacionarnom Poasonovom potoku kod kojeg je intenzitet konstantan:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const} \quad (4.11)$$



Slika 4.1. Stabilnost Poasonovih potoka, generalni koncept

srednji broj događaja koji se pojavljuje na intervalu  $(t, t+\tau)$  ne zavisi od vremena  $t$ , već samo od dužine intervala  $\tau$ . Imamo da je:

$$a = a(t, \tau) = a(\tau) = \int_t^{t+\tau} \lambda dt = \lambda(t + \tau) - \lambda t = \lambda \tau \quad (4.12)$$

Verovatnoća da se na proizvoljno izabranom intervalu  $\tau$  pojavi  $k$  događaja jednaka je:

$$P(X = k) = \frac{(\lambda \tau)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda \tau} \quad (4.13)$$

Verovatnoća da se u vremenu  $\tau$  realizuje barem jedan događaj jednaka je zbiru verovatnoća realizacije jednog ili više događaja (4.14):

$$P(X > 0) = \frac{(\lambda \tau)^1}{1!} e^{-\lambda \tau} + \frac{(\lambda \tau)^2}{2!} e^{-\lambda \tau} + \dots + \frac{(\lambda \tau)^k}{k!} e^{-\lambda \tau} + \dots \quad (4.14)$$

Verovatnoća pojave ni jednog događaja je komplementarna sa (4.14) i iznosi (4.15):

$$P(X = 0) = \frac{(\lambda\tau)^0}{0!} e^{-\lambda\tau} = e^{-\lambda\tau} \quad (4.15)$$

A verovatnoća da se pojavi barem jedan događaj jednaka je (4.16):

$$P(X > 0) = 1 - P(X = 0) = 1 - e^{-\lambda\tau} = \int_0^{\tau} \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (4.16)$$

Tj. u Poasonovom toku, vreme pojave barem jednog događaja ima eksponencijalnu raspodelu verovatnoće, u uslovima stacionarnosti sa parametrom  $\lambda$ . Funkcija i gustina eksponencijalne raspodele su date u obrazcima (4.17) i (4.18):

$$F(t, \lambda) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

$$f(t, \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

Parametri eksponencijalne raspodele jednaki su:

a) Matematičko očekivanje slučajne promenljive jednako je :

$$M(T) = \int_0^{\infty} t \cdot \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (4.19)$$

b) Formula za standardnu devijaciju eksponencijalne raspodele izvodi se dokazno na sledeći način:

$$\begin{aligned} D(T) &= M(T^2) - M^2(T) = \int_0^{\infty} t^2 \cdot \lambda e^{-\lambda t} dt - \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 = \lim_{b \rightarrow \infty} [-t^2 \cdot e^{-\lambda t}]_0^b + 2 \int_0^{\infty} t \cdot e^{-\lambda t} dt - \frac{1^2}{\lambda^2} = \\ &= \frac{2}{\lambda} \cdot \int_0^{\infty} t \cdot \lambda e^{-\lambda t} dt - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{2}{\lambda} \cdot M(T) - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{2}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} \\ D(T) &= \frac{1}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Eksponencijalna raspodela se često koristi u raznim primenama, na primer, pri analizi pouzdanosti rada sistema, kao model za vreme između dva kvara itd. U ovim situacijama recipročna vrednost parametra  $\lambda$  se javlja kao mera prosečnog vremena rada uređaja koji se ispituje.

Eksponencijalna raspodela ima karakterističnu vrednost koeficijenta varijacije, koji je definisan kao odnos standardne devijacije i srednje vrednosti:

$$c_v = \frac{\sqrt{D(T)}}{M(T)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}}}{\frac{1}{\lambda}} = 1 \quad (4.21)$$

Takozvanim „prosejavanjem” ili „proređivanjem” prostih potoka događaja nastaje Erlangov potok događaja. Naime, Erlangov potok  $k$ -tog reda se dobija tako da se u prostom potoku zadrži svaka  $k$ -ta tačka, a ostale se odbacuju. Interval vremena  $T$  između susednih događaja u Erlangovom potoku  $k$ -tog reda predstavlja zbir  $k$  nezavisnih slučajnih veličina  $T = T_1 + T_2 + \dots + T_k = \sum_{i=1}^k T_i$ . Svaka od veličina  $T_1, T_2, \dots, T_k$ , ima eksponencijalnu raspodelu i sabiranjem  $k$  nezavisnih eksponencijalnih raspodela dobija se Erlangova raspodela koja može da se koristi za modeliranje vremena opsluge. Ona je definisana sa dva parametra: redom  $k$  (parametrom oblika) i srednjim vremenom opsluživanja.

Parametar  $k$  se izračunava kao količnik kvadrata matematičkog očekivanja intervala vremena između dolazaka klijenata u sistem i disperzije intervala, odnosno  $k = [M(T)]^2 / D(T)$ .

Eksponencijalna raspodela predstavlja Erlangovu raspodelu prvog reda ( $k=1$ ). U praksi se najčešće sreću Erlangove raspodele drugog reda.

Funkcija i gustina Erlangove raspodele su date u obrascima (4.17/1) i (4.18/1):

$$F_k(t, \lambda) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} \sum_{i=1}^k \frac{(\lambda t)^{i-1}}{(i-1)!}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (4.17/1)$$

$$f_k(t, \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (4.18/1)$$

Parametri Erlangove raspodele jednaki su:

c) Matematičko očekivanje slučajne promenljive jednako je :

$$M(T) = \frac{k}{\lambda} \quad (4.19/1)$$

d) Standardna devijacija jednaka je :

$$D(T) = \frac{k}{\lambda^2} \quad (4.20/1)$$

Očigledno, za slučaj  $k=1$ , dobija se eksponencijalna raspodela. Funkcija i gustina Erlangove raspodele, matematičko očekivanje slučajne promenljive i standardna devijacija, prikazani u izrazima od 4.17/1 do 4.20/1, postaju identični izrazima kao u formulama od 4.17 do 4.20 sukcesivno.

### 4.1.2. Stohastički (slučajni) procesi

Među naučnicima je i danas aktuelna nedoumica da li su zakoni prirode deterministički ili slučajni. Da li slučajnost postoji samo zato što ne umemo da proučimo brojne uzročno posledične veze, ili je ona zaista realnost u životu i prirodi? Ovo pitanje naučnici su sebi postavljali još u 18 veku. Laplas je zastupao stanovište strogog determinizma i smatrao, da bi poznavanje parametara koji definišu stanje kosmosa i sveta oko nas, omogućilo tačno predviđanje rezultata svakog eksperimenta. Događaji bi se po njemu delili samo na nemoguće i sigurne. Međutim, na današnjem nivou stanja nauke sigurno je samo jedno, a to je, da slučajne pojave postoje i da imaju svoje zakonitosti.

„U teoriji verovatnoće i srodnim poljima, stohastički ili slučajni proces je matematički objekat koji je obično definisan kao familija slučajnih promenljivih. Istorijski, slučajne promenljive su bile povezane ili indeksirane nizom brojeva, koji se obično posmatraju kao tačke u vremenu, dajući interpretaciju stohastičkog procesa koji predstavlja numeričke vrednosti nekog sistema koji se slučajno menja tokom vremena. Primena i studiranje fenomena su inspirisali predloge za nove stohastičke procese. Primeri takvih stohastičkih procesa obuhvataju Vinerov proces ili Braunovo kretanje, koji je Luj Bašel koristio da izučava promene cena na Pariskoj berzi, ili Poasonov proces koji je koristio A. K. Erlang da studira broj telefonskih poziva koji se javlja u izvesnim vremenskim periodima. Ova dva stohastička procesa se smatraju najvažnijim i centralnim u teoriji stohastičkih procesa i otkriveni su nezavisno, više puta, pre i posle Bašela i Erlanga, u različitim okruženjima i zemljama. Termin slučajna funkcija se isto tako koristi za označavanje stohastičkog ili slučajnog procesa, zato što se stohastički proces može interpretirati i kao slučajni element u funkcijskom prostoru. Termini stohastički proces i slučajni proces se sinonimno koriste, često bez specifičnog matematičkog prostora za set koji indeksira slučajne varijable. Na osnovu njihovih matematičkih svojstava, stohastički procesi se mogu podeliti u različite kategorije, koje pored ostalih (slučajne šetnje, martingale, Levijeve procese, Gausovske procese, itd...) uključuju Markovljeve procese. Izučavanje stohastičkih procesa koristi matematičko znanje i tehnike, a teorija stohastičkih procesa se smatra važnim doprinosom matematici. Ovo predstavlja aktivnu temu istraživanja u pogledu teorije i primene”<sup>19</sup>. U ovoj doktorskoj disertaciji, za predloženi originalni model, korišćeni su postulati koji važe za Markovljeve procese.

### 4.1.3. Lanci Markova

Andrej Markov je poseban doprinos dao u razvoju osnove slučajnih procesa. Iako u teoriji slučajnih procesa postoje određene neusaglašenosti, osnova Markovljevih slučajnih procesa sadržana je u čuvenoj teoremi Markova i njene filozofske interpretacije „da budućnost ne zavisi od prošlosti, nego od sadašnjosti“. Ništa što se dogodilo u prošlosti, ne utiče, ne daje prognozu u pogledu budućnosti, a u budućnosti je sve moguće.

Eksplcitna matematička formulacija ove teoreme se nalazi u osobini bezposledičnosti (memoryless property, uobičajen termin). Ovu osobinu unikatno poseduje Eksponencijalna raspodela verovatnoća sa funkcijom (4.17) i gustinom (4.18) raspodele. Osobina bezposledičnosti u analitičkoj

<sup>19</sup> Preuzeto sa linka [https://sr.wikipedia.org/wiki/Stohasti%C4%8Dki\\_proces](https://sr.wikipedia.org/wiki/Stohasti%C4%8Dki_proces)

formulaciji kontinualne slučajne promenljive ima sledeći smisao: ako je raspodela vremena nekog slučajnog procesa eksponencijalna, njegova realizacija u budućnosti ne zavisi od dužine njegovog trajanja u prošlosti (4.22):

$$P(T > a + b | T > a) = \frac{P(T > a + b)}{P(T > a)} = \frac{\int_{a+b}^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt}{\int_a^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt} = \frac{e^{-\lambda(a+b)}}{e^{-\lambda a}} = e^{-\lambda b}$$

$$P(T > a + b | T > a) = \int_b^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = P(T > b) \quad (4.22)$$

Lanci Markova predstavljaju korisne alate u statističkom modelovanju u praktično svim poljima primenjene matematike i imaju veliku primenu u opisivanju ponašanja sistema. Za formiranje diferencijalnih jednačina stanja sistema opsluživanja kojim se bavi ova disertacija potrebno je poznavati proces Markova, koji je detaljno istraživani i ima široku primenu u redovima čekanja, kao i u operacionim istraživanjima, inženjerskom sistemu, vremenskim serijama itd. Oni igraju glavnu ulogu u teoriji masovnog opsluživanja. Imati svojstvo Markova znači da pored datog trenutnog stanja, kao što je već napred rečeno, buduće stanje sistema ne zavisi od prošlih stanja. Drugim rečima, to znači, da opis sadašnjosti u potpunosti sadrži informaciju koja može uticati na buduće stanje procesa (4.22).

Posmatrajmo stohastički proces  $\{X(t), t \in I\}$  kao familiju slučajnih promenljivih definisanih na istom prostoru verovatnoća gde je  $I$  tzv. parametarski skup stohastičkog procesa. U slučaju da je  $I$  prebrojiv skup, stohastički proces zovemo nizom ili lancem slučajnih promenljivih.

Stohastički proces sa konačnim ili prebrojivim skupom vrednosti i skup stanja označavamo sa  $S = \{x_1, \dots, x_n\}$ .

**Definicija 4.1.3.1.** Za stohastički proces  $\{X(t), t \in I\}$  kažemo da je *proces Markova* ako za svaki događaj iz skupa  $A$  i za svaki vremenski trenutak  $t_n < t_{n+1}$  važi:

$$P\{X(t_{n+1}) \in A | X(t) = x_t, t \leq t_n\} = P\{X(t_{n+1}) \in A | X(t) = x_{t_n}\} \quad (4.23)$$

Prema tome, verovatnoća da će proces preći iz stanja  $x_{t_n}$  u kojem se nalazi u trenutku  $t_n$ , u neko drugo stanje iz skupa  $A$ , u trenutku  $t_{n+1}$ , ne zavisi od načina na koji je proces dospeo u stanje  $x_{t_n}$  iz stanja  $x_{t_0}$  u kojem se proces nalazio u početnom trenutku  $t_0$ .

Lanci Markova su posebna vrsta procesa Markova, gde se proces može nalaziti samo u konačnom broju stanja.

Analizom determinističkih sistema vidi se najjednostavniji način postojanja lanca Markova, odnosno da sledeća pozicija u nizu zavisi, tj. predstavlja se isključivo kao funkcija prethodne pozicije. U svakom trenutku sistem, na osnovu date raspodele slučajne promenljive, može promeniti stanje, ili ostati



u istom. Promene stanja nazivamo prelazima (tranzicijom), a verovatnoće, koje se odnose na različite promene stanja, nazivamo verovatnoćama prelaza<sup>20</sup>.

**Definicija 4.1.3.2.** Verovatnoća prelaska iz  $i$ -tog u  $j$ -to, odnosno susedno stanje u jednom koraku je:

$$p_{i,j}^{n,n+1} = P\{X_{n+1} = x_j \mid X_n = x_i\}, \quad n \geq 0 \quad (4.24)$$

**Definicija 4.1.3.3.** Ako verovatnoća  $p_{i,j}^{n,n+1}$  ne zavisi od broja koraka  $n \geq 0$ , odnosno vremenskih trenutaka, tada je lanac homogen (stacionaran) i važi:

$$p_{i,j} = P\{X_{n+1} = x_j \mid X_n = x_i\} \quad (4.25)$$

$$\text{Matricu } \mathbf{P} = \mathbf{P}_1 = [p_{i,j}]_{i,j} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}_{i,j} \quad (4.26)$$

nazivamo matricom prelaza za jedan korak. Uzimamo sve  $p_{i,j}$  gde je matrica reda  $i=j$ , odnosno matrica mora da bude kvadratna dimenzija  $n \times n$ . Zbir verovatnoća po vrstama u „matrici prelaza” je uvek 1.

**Definicija 4.1.3.4.** Analogno def. 4.1.3.3. verovatnoća prelaska iz  $i$ -tog u  $j$ -to stanje u  $n$  koraka je:  $p_{i,j}(n) = P\{X_{m+n} = x_j \mid X_m = x_i\}$  (4.27)

$$\text{Matrica prelaza za } n \text{ koraka je: } \mathbf{P}_n = [p_{i,j}(n)]_{i,j} \quad (4.28)$$

Izračunavanje ovih verovatnoća prelaza u  $n$  koraka omogućava nam jednačina Čepmen–Kolmogorova (1):

$$p_{i,j}(n+m) = \sum_{k=0}^{\infty} p_{i,k}(n) p_{k,j}(m) \quad \text{za } \forall i, j, m, n \geq 0. \quad (4.29)$$

U matičnom obliku izraz Čepmen-Kolmogorovog procesa (4.29) glasi:

$$\begin{aligned} P_{m+n} &= P_m \cdot P_n \text{ i ako uvrstimo da je } m=n=1 \text{ dobićemo da je } P_2 = P_1 \cdot P_1 = P \cdot P = P^2, \\ P_3 &= P_2 \cdot P_1 = P^2 \cdot P = P^3, \text{ dalje } P_4 = P_3 \cdot P_1 = P^3 \cdot P = P^4 \dots \text{ što daje:} \\ \mathbf{P}_n &= \mathbf{P}^n \end{aligned} \quad (4.30)$$

Pretpostavljamo da lanac Markova ima konačno mnogo stanja  $S = \{x_1, \dots, x_n\}$ . Sa  $p_i(n)$  označili smo verovatnoću da u trenutku  $n$  sistem bude u  $i$ -tom stanju  $p_i(n) = P\{X_n = x_i\}$ . Za  $n=0$ , dobijamo  $p_i(0)$  tzv. početnu verovatnoću i na osnovu nje možemo odrediti gde je sistem bio u

<sup>20</sup> **Napomena:** U ovom radu biće predložen nov model za neprekidan slučajna lanaca Markova, kod koga za razliku od diskretnog, vreme koje sistem provede u datom stanju je slučajna promenljiva koja ima eksponencijalnu raspodelu i u slučajevima Markovljevog lanca sa kontinuiranim vremenom prelazak iz stanja u stanje može se odigrati u bilo kom trenutku.

početnom trenutku. Početni vektor je  $p(0)=[p_1(0) p_2(0) p_3(0)..... p_m(0)]$ , analogno je  $p(k)=[p_1(k) p_2(k) p_3(k)..... p_m(k)]$ , pa je Čepmen-Kolmogorova jednačina za  $p(k)$ :

$$p(k) = p(0) \cdot P^k \quad (4.31)$$

**Definicija 4.1.3.5.** Ako  $p(k)$  ne zavisi od  $k$ , kažemo da je lanac stacionaran.

**Definicija 4.1.3.6.** Za Markovljev lanac kažemo da je ergodičan ako postoji  $n \in N$  tako da matrica  $P_n = P^n$  ima sve pozitivne elemente.

**Definicija 4.1.3.7.** Za slučajni proces Markova kažemo da je ergodičan, ako je definisan na diskretnom skupu i ako po isteku dovoljno velikog intervala vremena, verovatnoće stanja sistema ne zavise od početnih uslova, početnog trenutka, ni vremena koje je prošlo.

**Definicija 4.1.3.8.** Za proces Markova kažemo da je nesvodljiv ukoliko se u svako stanje procesa može doći iz drugog stanja procesa.

**Definicija 4.1.3.9.** Ako je lanac nesvodljiv tada se sva stanja ponavljaju ili se iz svakog stanja može preći u drugo stanje

**Definicija 4.1.3.10.** Stanje  $x_j$  je povratno ako je verovatnoća da se sistem iz  $x_j$  bar jednom vrati u  $x_j$  jednaka 1.

**Definicija 4.1.3.11.** Za svaki ergodičan lanac i za svako  $i$  postoje verovatnoće  $p_j^* = \lim_{n \rightarrow \infty} p_{i,j}(n)$  koje se nazivaju finalne (granične) verovatnoće, što znači da iz bilo kog stanja sistem, posle dovoljno dugo vremena, prelazi u stanje  $j$  sa verovatnoćom  $p_j^*$ .

Finalne verovatnoće računamo iz sistema  $p^* = p^*P$

$$\sum_{j=0}^{\infty} p_j^* = \mathbf{1} \text{ gde je } p^* := (p_0^*, p_1^*, \dots) \quad (4.32)$$

Može se pokazati da prethodni sistem ima jedinstveno pozitivno rešenje<sup>21</sup>.

Pored razmatranja diskretnog slučaja lanca Markova postoji i neprekidan slučaj lanca Markova gde je vreme koje sistem provede u datom stanju slučajna promenljiva koja ima eksponencijalnu raspodelu.

**Definicija 4.1.3.12.** Neka je  $\{X(t), t > 0\}$  stohastički proces sa neprekidnim vremenom i sa skupom stanja  $\mathbb{N}_0 = \{0, 1, 2, \dots\}$ . Kažemo da je  $\{X(t), t > 0\}$  neprekidni slučaj lanca Markova ako važi:

<sup>21</sup> **Napomena:** Ako je skup stanja konačan i obuhvata  $k$  stanja, tada imamo  $k$  jednačina sledećeg oblika:  $p_j^* = \sum_{i=0}^{k-1} p_i^* p_{i,j}$ , što zajedno sa uslovom  $\sum_{j=0}^{k-1} p_j^* = 1$ , daje  $k+1$  jednačinu sa  $k$  nepoznatih.

$$\begin{aligned}
P\{X(t+s) = x_j \mid X(s) = x_i, X(r) = x_r, 0 \leq r < s\} = \\
= P\{X(t+s) = x_j \mid X(s) = x_i\} = p_{i,j}(t) \text{ za } \forall s, t \geq 0 \text{ i za } \forall x_r \in \mathbb{N}_0
\end{aligned} \tag{4.33}$$

Izračunavanje ovih verovatnoća prelaza u  $n$  koraka omogućava nam jednačina Čepmen–Kolmogorova (2):

$$p_{i,j}(t+s) = \sum_{k=0}^{\infty} p_{i,k}(t) p_{k,j}(s) = \sum_{k=0}^{\infty} p_{i,k}(s) p_{k,j}(t) \text{ za } \forall t, s \geq 0. \tag{4.34}$$

**Definicija 4.1.3.13** Veličine  $v_{i,j} := v_i p_{i,j}$  za  $\forall i \neq j \in \{0, 1, 2, \dots\}$  se zovu infinitezimalni parametri ili trenutne stope prelaza za neprekidan slučaj lanaca Markova. Ako znamo veličine  $v_{i,j}$  za  $\forall i \neq j$ , tada možemo da izračunamo stope  $v_i$  i verovatnoće  $p_{i,j}$ .

$$\text{Imamo } \sum_{i \neq j} v_{i,j} = v_i \sum_{i \neq j} p_{i,j} = v_i \quad (\text{jer je } p_{i,i} = 0) \tag{4.35}$$

Ako označimo da nam je  $v_{i,i} = -v_i$  sledi da je  $\sum_{j=0}^{\infty} v_{i,j} = 0$ .

Dobijamo matricu  $A$  (4.36) koja se zove generator matrica za neprekidan slučaj lanaca Markova  $\{X(t), t > 0\}$ .

$$A = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \end{matrix} \begin{bmatrix} v_{0,0} & v_{0,1} & v_{0,2} & \cdots \\ v_{1,0} & v_{1,1} & v_{1,2} & \cdots \\ v_{2,0} & v_{2,1} & v_{2,2} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

Matrica  $A$  odgovara matrici prelaza  $P$  (4.26) za diskretni slučaj lanaca Markova i prikazaćemo dva sistema diferencijalnih jednačina za određivanje verovatnoća  $p_{i,j}$ .

**Teorema 4.1.3.1.** Kolmogorova backward jednačina

$$\text{Za svako stanje } i, j \in \mathbb{N}_0 \text{ i za } \forall t \geq 0, \text{ važi: } p'_{i,j}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} v_{i,k} p_{k,j}(t) \tag{4.37}$$

**Teorema 4.1.3.2.** Kolmogorova forward jednačina

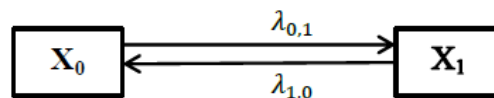
$$\text{Za svako stanje } i, j \in \mathbb{N}_0 \text{ i za } \forall t \geq 0, \text{ važi: } p'_{i,j}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} p_{i,k}(t) v_{k,j} \tag{4.38}$$

#### 4.1.4. Teorijski primer rešenja sistema diferencijalnih jednačina na jednom prostom diskretnom sistemu u kojem protiče Markovljev proces sa neprekidnim vremenom

**Teorema 4.1.4.1.** Ako su potoci događaja koji prevode sistem iz jednog stanja u drugo Poasonovi, onda je slučajni proces, koji protiče u sistemu, Markovljev sa neprekidnim vremenom.

Da bismo ovakve sisteme mogli opisati potrebno je:

- poznavati sva stanja u kojima sistem može da se nađe,
- sastaviti graf stanja i ukazati na sve moguće neposredne prelaze sistema iz jednog stanja u drugo,
- za svaki mogući prelaz dati odgovarajući intenzitet  $\lambda_{i,j}(t)$  Poasonovog potoka događaja koji prevodi sistema iz stanja  $x_i$  neposredno u stanje  $x_j$ ,
- obavezno dati početno stanje sistema, odnosno stanje u kojem se sistem nalazio u početnom momentu vremena (za  $t=0$ ).



**Slika 4.2.** Prost graf dva stanja

U primeru sistema na slici 4.2. imamo dva stanja  $x_0$  i  $x_1$ . Sa  $\lambda_{0,1}(t)$  označimo intenzitet Poasonovog potoka događaja koji sistem prevodi iz stanja  $x_0$  u stanje  $x_1$  i sa  $\lambda_{1,0}(t)$  intenzitet Poasonovog potoka koji sistem prevodi iz stanja  $x_1$  u stanje  $x_0$ . Ako je, u opštem slučaju prelaz iz stanja  $x_k$  u stanje  $x_m$  nemoguć, onda se strelica na grafu stanja ne crta i smatramo da je  $\lambda_{k,m}(t) = 0$ , dok je prema prethodno izloženoj materiji, takođe i  $\lambda_{k,k}(t) = 0$ .

Pokazaće se princip izračunavanja određivanja verovatnoća stanja iz sistema diferencijalnih jednačina na primeru stanja sistema na slici 4.2.

Sastavićemo diferencijalne jednačine koje određuju verovatnoće  $p_0(t)$  i  $p_1(t)$ , tj. verovatnoće da se posmatrani sistem u jedinici vremena  $t$  nađe u stanju  $x_0$  ili u stanju  $x_1$ .

Zbog toga će se vremenu  $t$  dodati priraštaj vremena  $\Delta t$  i razmatramo verovatnoću  $p_0(t + \Delta t)$  da se u momentu vremena  $(t + \Delta t)$  sistem nađe u stanju  $x_0$ . To može da se realizuje u dva slučaja koja isključuju jedan drugog: da je sistem u trenutku  $t$  bio već u stanju  $x_0$  i da za vreme  $\Delta t$  nije promenio stanje, ili da je sistem u trenutku  $t$  bio u stanju  $x_1$  i da je za vreme  $\Delta t$  prešao u stanje  $x_0$ . Koristeći osobinu ordiniranosti Poasonovog potoka, o čemu je bilo reči u delu 4.1.1. ove disertacije, verovatnoća više prelaza za vreme  $\Delta t$  je beskonačno mala veličina višeg reda od  $\Delta t$ , tj. ona je veličina  $0(\Delta t)$ . Verovatnoća da sistem pređe iz stanja  $x_0$  u stanje  $x_1$  za vreme  $(t + \Delta t)$  iznosi  $\lambda_{0,1}(t) + 0(\Delta t)$ , a verovatnoća da sistem pređe iz stanja  $x_1$  u stanje  $x_0$  iznosi  $\lambda_{1,0}(t) + 0(\Delta t)$ . Koristeći pravila zbira i proizvoda verovatnoća imamo:

$$p_0(t + \Delta t) = p_0(t)[1 - \lambda_{0,1}(t)\Delta t + 0(\Delta t)] + p_1(t)[\lambda_{1,0}(t)\Delta t + 0(\Delta t)] =$$

$= p_0(t)[1 - \lambda_{0,1}(t)\Delta t] + p_1(t)\lambda_{1,0}(t)\Delta t + o(\Delta t)$ , iz čega dobijamo

$$\frac{p_0(t+\Delta t) - p_0(t)}{\Delta t} = -\lambda_{0,1}(t)p_0(t) + \lambda_{1,0}(t)p_1(t) + \frac{o(\Delta t)}{\Delta t}. \text{ Za slučaj kada nam } \Delta t \rightarrow \infty \text{ imamo}$$

$$\left(\lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} = 0\right), \text{ sledi}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{p_0(t+\Delta t) - p_0(t)}{\Delta t} = -\lambda_{0,1}(t)p_0(t) + \lambda_{1,0}(t)p_1(t). \text{ Izraz sa leve strane predstavlja izvod}$$

funkcije  $p_0(t)$  i konačan oblik diferencijalne jednačine glasi:

$$p_0'(t) = -\lambda_{0,1}(t)p_0(t) + \lambda_{1,0}(t)p_1(t) \quad (4.39)$$

U navedenom primeru druga jednačina glasi:

$$p_1'(t) = -\lambda_{1,0}(t)p_1(t) + \lambda_{0,1}(t)p_0(t) \quad (4.40)$$

Analogno, možemo da dobijemo toliko diferencijalnih jednačina koliko ima mogućih stanja sistema.

Kako je posmatran Markovljev proces sa neprekidnim vremenom, verovatnoće stanja se određuju sistemom linearnih diferencijalnih jednačina, što u slučaju da proces nije Markovljev nije moguće.

Verovatnoće stanja  $p_i(t)$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) se određuju integracijom datih diferencijalnih jednačina za zadate početne uslove, a to su : ako se sistem u početnom momentu vremena nalazio u stanju  $x_m$ , onda je za  $t=0$ , ispunjeno  $p_m(0) = 1$ ,  $p_i(0) = 0$  za  $i \neq m$  i uopšteno mogu biti zadate verovatnoće svih stanja u početnom momentu vremena koje su različite od 0 i 1 uz zadovoljenje uslova:

$$\sum_{i=1}^{\infty} p_i(0) = 1 \quad (4.41)$$

Metodološki, uz korišćenje grafa stanja<sup>23</sup>, moguće je formiranje sistema diferencijalnih jednačina za verovatnoće stanja sistema za slučaj da sistem ima više stanja, a ne samo dva, kako je ilustrovano u ovom uprošćenom primeru. U tom slučaju opšti oblik sistema diferencijalnih jednačina (uz unapred zadate uslove gde je  $\lambda_{k,k} = 0$ ,  $k=0, 1, 2, \dots, n$ , i ako sistem ima  $n+1$  stanja:  $x_0, x_1, \dots, x_n$ ) glasi (4.42):

<sup>22</sup> Pri izvođenju ove diferencijalne jednačine korišćene su obe osobine Poasonovog toka, osobina ordiniranosti i besposledičnosti („memoryless property”). Naravno da je za  $\forall t$  zbir verovatnoća jednak 1, u navedenom primeru  $p_0(t) + p_1(t) = 1$

<sup>23</sup> Graf stanja je pregledniji, a koristi se na način tako da jednoznačno odgovara sistemu diferencijalnih jednačina (važi i obrnuto). Na taj način imamo kompletnu informaciju o razmatranom sistemu, kako samog grafa stanja tako i o sistemu diferencijalnih jednačina.

$$p'_k(t) = -\sum_{j=0}^n \lambda_{k,j}(t)p_k(t) + \sum_{i=0}^n \lambda_{i,k}(t)p_i(t) \quad k=0,1,2,\dots, n. \quad (4.42)$$

Navedeni, kao i u novopredloženom modelu u ovoj doktorskoj disertaciji, način rešavanja diferencijalnih jednačina, moguć je samo ako su potoci događaja koje posmatramo, a to su pristizanja drumskih i železničkih vozila u sistem putno-pružnog prelaza, Poasonovi potoci. Ako proces koji protiče u sistemu masovnog opsluživanja (SMO) nije Markovljev, analitička ispitivanja zahtevaju mnogo složenije matematičke aparate.

Ovaj problem se prevazilazi, a i ovde je izvršeno takvo razmatranje, da se ne-Poasonov potok događaja zamenjuje Poasonovim potokom sa istim intenzitetom, pri čemu su dobijena rešenja blizu tačnih. Navedene aproksimacije se zasnivaju na graničnim teoremama prema kojim su potoci događaja, koji protiču u SMO, po svojim osobinama i strukturi veoma bliski poasonovskim. A neznatne razlike realnog stacioniranog i Poasonovog potoka slučajnih događaja, prevazilazi se prihvatanjem približno jednakih vrednosti matematičkog očekivanja i disperzije na posmatranom intervalu realnih potoka.

## 4.2. UVOD U TEORIJU SERVISNIH SISTEMA (REDOVA ČEKANJA)

### 4.2.1. Fenomen sistema redova čekanja

Teorija redova čekanja se smatra granom operacionih istraživanja kao pod-poljem primene u matematici. Otkrivena je pre više od 100 godina, objavljivanjem dela i uspehom praktične primene danskog matematičara, statističara i inženjera Agner Krarup Erlang (1878–1929). Nakon pojave Erlangovog pionirskog rada, tokom jednog celog veka razvoja, napisan je zaista imponozantan broj radova i knjiga iz ove oblasti (neke od najpoznatijih su Kleinrock 1975; Arnold, 1978; Nelson 1995, Gross, Harris, 1998...), a danas praktično da i ne postoji udžbenik operacionih istraživanja u kome ova teorija nije pomenuta (Hillier, Lieberman 1995; Taha 2003).

Međutim, nakon početnog uspeha u primeni, ove avangardne probablističke metode za donošenje odluka o resursima potrebnim za pružanje usluge, uočena su brojna analitička ograničenja. Teorija redova čekanja se zasniva na elementarnoj teoriji sistema, na strukturi entiteta i njihovim odnosima. Primarna klasifikacija sistema redova čekanja zavisi od verovatnoće raspodele vremena. Ako je gustina distribucije eksponencijalna  $f(t) = \lambda(t)e^{-\lambda(t)}$ , sistem redova čekanja je Markovljev. U slučaju bilo koje druge vremenske raspodele, sistem nije Markovljev. Markovljevi sistemi su po pravilu analitički dostupni. Inače, ako gustina distribucije nije eksponencijalna, analitički proračun je izuzetno težak i u nekim slučajevima, do danas nerešiv. Ova klasifikacija je ustanovljena u čast Andrei Andreyevich Markov (1856–1922). David George Kendall (1918–2007) prilagodio je osnovnu sistematizaciju i notaciju sistema redova čekanja do primarne klasifikacije. Sekundarna klasifikacija se takođe zasniva na odnosima sistema. Ako je prosečna vrednost raspodele verovatnoće vremena

<sup>24</sup> Za rešenje sistema diferencijalnih jednačina važe i početni uslovi, a to su:  $p_0(0), p_1(0), \dots, p_n(0)$ ;  $0 \leq p_k(0) \leq 1$ ;  $\sum_{k=0}^n p_k(0) = 1$  i verovatnoće  $p_k(t)$  zadovoljavaju normirajući uslov u proizvoljnom momentu vremena, odnosno  $\sum_{k=0}^n p_k(t) = 1$ , što u stvarnom smislu znači da će se sistem u proizvoljnom trenutku  $t$  naći u jednom od svojih mogućih stanja.

konstantna, sistem čekanja je stacionaran. Stacionaran Markovljev sistem redova čekanja ima eksponencijalnu gustinu raspodele  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ ,  $\lambda(t) = \lambda = 1 = \text{const}$ . Metodu za analitičko rešenje nestacionarnog Markovljevog sistema redova čekanja, 1931. godine predstavio je Nikolaevich Kolmogorov (1903–1987). Rešenje koje je odredio Kolmogorov za Markovljeve sisteme redova čekanja je uglavnom isti kao i za ne-Markovljeve sisteme. Zasnovano je na sistemu diferencijalnih jednačina. Broj jednačine uvek je jednak broju stanja, što takođe može biti beskonačno. Primena Laplasove transformacije za rešavanje sistema diferencijalnih jednačina je mnogo lakša u slučaju Markovljevih procesa. Takođe, podrazumeva se da je sistem redova čekanja ergodičan.

Mnogi veliki matematičari i inženjeri doprineli su razvoju teorije redova čekanja: Félix Pollaczek (1892–1981), Aleksander Yakovlevich Khinchin (1894–1959), naš savremenik, Sir John Frank Charles Kingman (rođen 1939), David George Kendall (1918–2007) i naši drugi savremenici Jonh Dutton Conant Little (rođen 1928) itd. Njihova istraživanja su se dominantno fokusirala na rešavanje ne-Markovljevih sistema redova čekanja. Međutim, u pristupu rešavanja, nedostajala su razmatranja i rešenja nestacionarnih ne-Markovljevih sistema redova čekanja. Razvoj računara osamdesetih i devedesetih godina 20. veka, doneo je pristup i prognozu da se svaki sistem redova čekanja može rešiti upotrebom računarske simulacije. Ovakav stav donekle je obeshrabrio dalje napore na analitičkom pristupu rešavanja teorije redova čekanja i Koenigsberg je to dosledno opisao u postavljenoj i obrazloženoj antitezi „Is queuing theory dead?” 1991. godine<sup>25</sup>. Njegovu apsolutno tačnu ocenu neophodnosti analitičkog pristupa, potvrdili su Schwartz, Selinka i Stoletz, posebno za nestacionirane vremenski zavisne ne-Markovljeve sisteme redova čekanja. Analitički pristup u rešavanju ovih sistema ostaje imperativ. Ovaj imperativ ne postoji sam po sebi, podstiče ga praktična primena sistema redova čekanja i suština rešenja „Queuing theory” leži u analitičkom pristupu i njegovoj primeni<sup>26</sup>.

#### 4.2.2. Osnovne definicije i oznake

Značaj teorije masovnog opsluživanja leži u mogućnosti da se izvrši matematičko modelovanje realnih procesa opsluživanja i kvantifikovanje određenih parametara procesa, kao što su: brzina opsluživanja, vreme čekanja u redu na opsluživanje, dužina reda, broj mesta na kojima se opslužuje, vreme opsluživanja. Takvi modeli omogućavaju analizu procesa opsluživanja i rešavanje organizacionih pitanja opsluživanja, u smislu poboljšanja navedenih parametara bitnih za rad sistema koji vrši opsluživanje i optimizaciju rada sistema. Primena ovih modela na rešavanje problema u praksi donosi veliku korist društvu: pozitivni ekonomski efekti, povećanje pouzdanosti izvršenja zadataka i organizacije opsluživanja, predviđanje ponašanja sistema u različitim situacijama.

Masovno opsluživanje srećemo u slučajevima kada je potrebno organizovati opsluživanje većeg broja „klijenata”<sup>27</sup> (Vukadinović, 1988). Pod klijentom podrazumevamo proizvoljan zahtev ili

<sup>25</sup> E. Koenigsberg, Is queueing theory dead?, Omega Volume 19, Issues 2–3, 1991, 69-78, [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(91\)90017-N](https://doi.org/10.1016/0305-0483(91)90017-N)

<sup>26</sup> Veći deo odeljka 4.2.1. citiran iz rada: Ilija Tanackov, Olegas Prentkovskis, Žarko Jevtić, Gordan Stojić, and Pamela Ercegovac, A New Method for Markovian Adaptation of the Non-Markovian Queueing System Using the Hidden Markov Model, Algorithms 2019, 12 (7), 133; <https://doi.org/10.3390/a12070133>

<sup>27</sup> Pored termina „klijent”, u ovom delu rada uporedo se koristi i termin „korisnik”

porudžbinu za opsluživanjem i klijent, kao što je slučaj u ovom radu, može biti drumsko ili železničko vozilo koje na putno-pružnom prelazu čeka na prelazak putno-pružnog prelaza. Klijenti pristupaju mestu opsluživanja u slučajne momente vremena i za većinu slučajeva, možemo pretpostaviti da su momenti nailaska klijenata, nezavisni među sobom, a skup klijenata koji pristupa opsluživanju nazivamo potokom klijenata (Vukadinović, 1988). Ako ne mogu odmah biti opsluženi, klijenti obrazuju red i to je jedan od razloga da je ova teorija nazvana po engleskoj reči *Queueing Theory* - teorija redova čekanja. Termin *Queueing Theory* prvi put je upotrebio Kendall (1951). Sredstva sa kojima se vrši opsluživanje nazivamo kanali opsluživanja. Najvažniji element teorije masovnog opsluživanja je vreme opsluživanja i ono predstavlja osnovnu karakteristiku kanala opsluživanja.

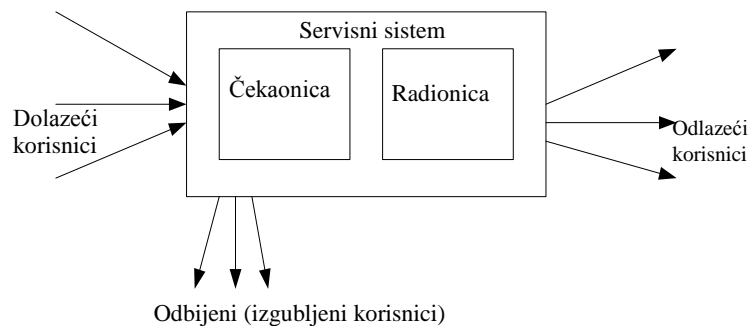
Osnovni elementi servisnog sistema su kao što se može videti na slici 4.3:

- Dolazeći korisnici – oni predstavljaju ulaz u servisni sistem. Korisnici dolaze u servisni sistem sa ciljem da im servisni sistem pruži odgovarajuću uslugu. Korisnici se karakterišu sa količinom posla koju nose (da li će usluga trajati duže ili kraće). Takođe se definiše i proces dolazaka u servisni sistem koji predstavlja raspodelu dolazaka korisnika u servisni sistem. U ovoj doktorskoj disertaciji za dolazak drumskih vozila i vozova na putno-pružni prelaz koristiće se Poasonov proces. Empirijski je utvrđeno da se u mnogim okolnostima nastali stohastički procesi mogu dobro približiti Poasonovim procesom<sup>28</sup>.
- Odbijeni (izgubljeni korisnici) – to su korisnici koji su odbijeni od strane servisnog sistema i kojima usluga nije pružena. Najčešći razlog je zauzeće svih resursa servisnog sistema, ali postoje i drugi kao npr. niži prioritet od nekih prioritetnijih korisnika koji dovode do odbijanja posluživanja korisnika nižeg prioriteta u slučaju kada je servisni sistem preopterećen i sl. Odbijeni korisnici zato moraju ili ponovo pokušati (ponovo kao dolazeći korisnici) da dobiju uslugu od servisnog sistema ili odustati od tražene usluge;
- Odlazeći korisnici – korisnici koji su opsluženi od strane servisnog sistema i napuštaju ga oslobađajući pri tome resurse servisnog sistema koje su zauzimali;
- Čekaonica – deo servisnog sistema gde su korisnici prihvaćeni od strane servisnog sistema i čekaju da budu opsluženi. Čekaonica može i da izostane, a ako postoji, u realnosti je konačnog kapaciteta, iako se u teoriji koriste i modeli koji razmatraju čekaonicu beskonačnog kapaciteta;
- Radionica – u radionici se nalaze serviseri (kojih ima 1 ili više) koji obrađuju poslove koje im donose korisnici. Kapacitet radionice je broj serviseri u radionici. Ukupan zbir kapaciteta čekaonice i radionice daje kapacitet servisnog sistema koji predstavlja maksimalni broj korisnika koje servisni sistem može da prihvati.

---

<sup>28</sup> Ivo Adan, Jacques Resing, *Queueing Systems*, Department of Mathematics and Computing Science, Eindhoven University of Technology, Eindhoven 2015.





**Slika 4.3.** Opšti model servisnog sistema

U okviru radionice se definiše i pojam disciplina opsluživanja koja definiše redosled kojim će se korisnici, koji čekaju u čekaonici, opsluživati. Primeri discipline opsluživanja su: SIRO (Stochastic In Random Out) – slučajan izbor korisnika iz reda, LCFS (Last Come First Served) – opslužuje se korisnik koji je poslednji došao u servisni sistem, ili LIFO (Last In First Out), odnosno – ko poslednji ulazi, prvi izlazi, FCFS (First Come First Served) odnosno FIFO (First In First Out) – opslužuje se korisnik koji je prvi došao u servisni sistem i sa prioritetom (Priority)–opslužuje se korisnik najvišeg prioriteta, itd. Takođe se definiše i proces obrade korisnika koja predstavlja raspodelu vremena obrade korisnika;

Posmatranje realnog sistema kao SMO, u skladu sa prikazanom analogijom i utvrđivanje funkcionalnih veza, odnosno vrednosti odgovarajućih pokazatelja primenom TMO, pruža onda mogućnost za davanje odgovora na neka pitanja (Heragu, 1997):

- Koliki je očekivani broj klijenata koji čekaju u redu?
- Koliko je očekivano vreme koje klijent provodi u sistemu?
- Kolika je verovatnoća da će klijent po dolasku u sistem zateći slobodan kanal opsluživanja?
- Kolika je verovatnoća zauzetosti svih kanala opsluživanja i sl.?

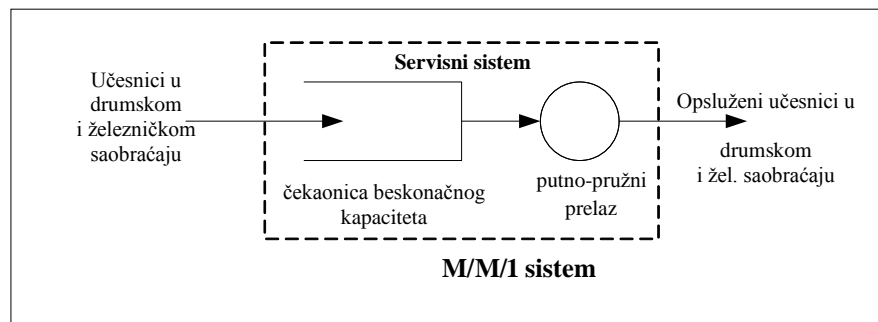
Da bi se ukazalo na konkretan model, uobičajeno se koristi Kendalova notacija, odnosno kako se u nekim izvorima navodi (Heragu, 1997), Kendal-Lijeva notacija, s obzirom da je Lee izvršio određene modifikacije u notaciji (Lee, 1966). U jednom istraživanju iz 1953. godine (Kendall, 1953) je predložio način označavanja koji se i danas koristi za klasifikaciju raznih modela čekanja u redu, a koje je standardizovano 1971. godine (Queueing Standardization Conference Report, May 11, 1971) i izgleda i funkcionise na sledeći način:  $A/B/m/k/l/Z$ , gde je:

- A – proces toka dolazaka korisnika i označava raspodelu vremena između dva uzastopna dolaska (vrednost M označava *Poisson* ili Markovljevu distribuciju dolaska; D - oznaka kada za funkciju ulaznog toka uzimamo da je konstantno vreme između dva uzastopna dolaska;  $E_k$ - oznaka kada je ulazni tok Erlangova raspodela reda k ; G –oznaka kada ulazni tok ima bilo koju raspodelu opšteg tipa)
- B – proces obrade (raspodela vremena opsluživanja) korisnika (vrednost M označava proces po eksponencijalnoj raspodeli);

- $m$  – broj serviseru u sistemu;
- $k$  – ukupan kapacitet servisnog sistema;
- $l$  – broj korisnika koji dolaze u servisni sistem;
- $Z$  – disciplina čekanja u čekaonici;

Primeri *Kendall*-ovih notacija:

- Sistem  $M/M/1$  – Ovo je model servisnog sistema kod kojeg je tok dolazaka *Poisson*-ov, obrada korisnika ima eksponencijalnu raspodelu, postoji jedan serviser i čekaonica je beskonačnog kapaciteta (slika 4.4);
- Sistem  $M/M/1/k$  – Isto kao u slučaju  $M/M/1$  sistema, samo sa razlikom da je čekaonica konačna i kapaciteta  $k-1$ ;
- Sistem  $M/M/m$  – Isto kao kod  $M/M/1$  sistema, samo sa razlikom da postoji  $m$  serviseru.



**Slika 4.4.** Servisni sistem  $M/M/1$

Rešavanje zadataka vezanih za modele masovnog opsluživanja sa brojem klijenata  $k(t)$  koji je stohastički proces, sa konačno ili prebrojivo mnogo stanja, vrši se najčešće diskretnim procesima Markova (Vukadinović i dr., 1970; Novikov i dr. 1969). U nekim komplikovanijim modelima kada postoje prioritetni klijenti itd., stanje može da se opiše vektorskim procesom Markova. Neki sistemi masovnog opsluživanja, čiji je skup različitih mogućih stanja neprebrojiv, bolje se opisuju neprekidnim procesom Markova (Hinčin, 1965; Karlin 1971; Kofman i dr., 1965). Univerzalna metoda pomoću koje se modeliraju sistemi masovnog opsluživanja uz primenu računara je metoda Monte Karlo, ali zbog ocene tačnosti dobijenih rešenja, postoje određene teškoće kod primene ovih metoda simulacija.

Poasonova pristizanja i eksponencijalne usluge omogućavaju nam da primenimo Markovljeve modele masovnog opsluživanja, koji se lako mogu analizirati i čiji se rezultati mogu praktično primeniti. Ovi modeli su se ranije koristili kao ispomoć u procesu odlučivanja u telefonskoj industriji. Osnovni Markovljev proces koji predstavlja broj korisnika u tim sistemima poznat je kao proces rađanja i umiranja, koji je u širokoj upotrebi kod modeliranja stanovništva. Ove pojave u našem sistemu masovnog opsluživanja predstavljaju proces pristizanja i proces odlazaka iz sistema.

Postoje tri vrste posmatranja tokova dolaska i to: tačkasti, brojački i intervalni proces. Tačkasti i brojački procesi su diskretni procesi, koji se opisuju diskretnom raspodelom verovatnoća tj.

verovatnoćama diskretnih događaja, a intervalni proces je kontinualan proces koji se opisuje gustinom verovatnoće.

U teoriji servisnih sistema pored procesa dolazaka korisnika koji opisuje kako korisnici pristižu u sistem, definiše se još jedan važan proces, a to je proces obrade korisnika. Kada korisnici stignu u sistem, ako budu prihvaćeni onda oni eventualno čekaju u čekaonici pa pređu u radionicu ili odmah uđu u radionicu gde ih obrađuje serviser, a vreme koje korisnik provede u radionici je vreme obrade korisnika i ono se smatra slučajnom veličinom u teoriji servisnih sistema. Vreme obrade po korisniku u jedinicama može definisati na sledeći način:

- vreme obrade po korisniku = količina posla koju nosi korisnik / kapacitet serviser;
- količina posla koju nosi korisnik = jedinica posla / korisnik;
- kapacitet serviser = jedinica posla / jedinica vremena;
- vreme obrade po korisniku = jedinica vremena / korisnik;

#### 4.2.3. Model M/M/1

U teoriji redova čekanja, i uopštenije, u drugim primenjenim stohastičkim modelima, razumno je dozvoliti da parametri modela variraju tokom vremena. Razvoj pristupa za evaluaciju učinka često je vođen problemima iz stvarnog sveta. U tabeli br. 4.1 (Schwarz i dr., 2016), dat je pregled većeg broja pristupa numeričkom rešavanju redova čekanja i jedan od navedenih načina rešenja SMO je korišćen u novopredloženom modelu.

Tabela 4.1 Evaluacija pristupa numeričkom rešavanju redova čekanja

Numeričko rešavanje Chapman-Kolmogorov jednačinama (CKEs) <sup>29</sup>	
Reference	Queueing system
Kolmogorov A. (1931)	M(t)/M/c
Leese and Boyd (1966)	M(t)/M/1
Koopman BO (1972)	M(t)/M/1/K
Kolesar et al. (1975)	M(t)/M(t)/c(t)
Rider KL (1976)	M(t)/M(t)/1
Bookbinder and Martell (1979)	M(t)/M/c/K
Rothkopf and Oren (1979)	M(t)/M(t)/c
Clark GM. (1981)	M(t)/M(t)/c
Parlar M. (1984)	M(t)/M(t)/c/K
Nozari A. (1985)	M(t)/M/c
Bookbinder JH (1986)	M(t)/M(t)/1/K
Van As HR (1986)	M(t)/M/1/K/NPPrio
Taaffe and Ong (1987)	PH(t)/M(t)/c/K
Ong and Taaffe (1988)	PH(t)/PH(t)/1/K

<sup>29</sup> Chapman-Kolmogorov equations (CKEs)

Taaffe and Clark (1988)	$M(t)/M(t)/1/K/NPPrio$
Jung and Lee (1889)	$M(t)/M/c(t)$
Tipper and Sundareshan (1990)	$M(t)/M/1$
Green and Kolesar (1991)	$M(t)/M/c$
Green et al. (1991)	$M(t)/M/c$
Jung (1993)	$M(t)/M/c$
Green and Kolesar (1995)	$M(t)/M/c$
Green and Kolesar (1997)	$M(t)/M/c$
Massey and Whitt (1997)	$M(t)/M/c$
Escobar et al. (2002)	$M(t)/Ek(t)/c/K$
Ingolfsson et al. (2002)	$M(t)/M/c(t)/K$
Ingolfsson et al. (2007)	$M(t)/M/c(t)$
Czachórski et al. (2009)	$G(t)/G/1/K/PPrio$
Gillard and Knight (2014)	$M(t)/M/c(t)$
Jacquillat and Odoni (2015)	$M(t)/Ek(t)/1$
<b>Aproksimacija surogat distribucijom (SDA)<sup>30</sup></b>	
Rider KL. (1976)	$M(t)/M(t)/1$
Rothkopf and Oren (1979)	$M(t)/M(t)/c$
Clark (1981)	$M(t)/M(t)/c$
Rothkopf and Johnston (1982)	$M(t)/G/1$
Taaffe and Ong (1987)	$PH(t)/M(t)/c/K$
Ong and Taaffe (1988)	$PH(t)/PH(t)/1/K$
Taaffe and Clark (1988)	$M(t)/M(t)/1/K/NPPrio$
Ingolfsson et al. (2007)	$M(t)/M/c(t)$
Lau and Song (2008)	$M(t)/M/c$
Massey and Pender (2013)	$M(t)/M/c(t) + M$
Pender (2014 a)	$M(t)/M(t)/c(t) + M(t)$
Pender (2014 b)	$M(t)/M(t)/c(t) + M(t)$
<b>Poluanalitički, polunumerički pristup (SASN)<sup>31</sup></b>	
Clarke (1956)	$M(t)/M(t)/1$
Luchak (1956)	$M(t)/PH(t)/1$
Luchak (1957)	$M(t)/PH(t)/1$
Wragg (1963)	$M(t)/M(t)/1$
Leese and Boyd (1966)	$M(t)/M/1$
Rosenlund (1976)	$M(t^x)/G/1$
Lyubarskii (1982)	$G(t)/G(t)/1$
Stadje (1990)	$M(t)/M(t)/2$
Zhang and Coyle (1991)	$M(t)/M(t)/1$

<sup>30</sup> Surrogate distribution approximation (SDA)

<sup>31</sup> Semi-analytical, semi-numerical approaches (SASN)

Margolius (1999)	M(t)/M(t)/c
Al-Seedy and Al-Ibraheem (2003)	M(t)/M(t)/∞
Nelson and Taaffe (2004)	PH(t)/PH(t)/∞
Margolius (2005)	M(t)/M(t)/c
	M(t)/M/c(t)
Margolius (2007)	PH(t)/M(t)/1
Margolius (2008)	M(t)/Ek/1
	M(t)/M(t)/1
Al-Seedy et al. (2009)	M(t)/M(t)/1
El-Sherbiny (2010)	M(t)/M(t)/∞
Nasr and Taaffe (2013)	PH(t)/M(t)/c/K

Numeričko rešenje za CKEs ima prednost u tome što se dobija potpuna vremenski zavisna raspodela verovatnoća stanja. Dakle, ovo rešenje se može koristiti za izračunavanje relevantnog kvantila (Ingolfsson i dr., 2002). Međutim, glavni nedostaci su u tome što se primenjuje pristup rešenja samo na markovske sisteme i potrebno je dosta vremena za izračunavanje (Ingolfsson i dr., 2007).

Ključna ideja SDA je izračunavanje samo trenutaka distribucije. Dakle, analiza učinka je ograničena na ove momente. Obično se izračunavaju prvi i drugi momenat broja aktivnosti u sistemu masovnog opsluživanja. SDA zahteva Markovljeve dolaske i procese usluge. Međutim, korišćenje distribucije faznog tipa omogućava analizu različitih koeficijenata varijacija (Taaffe i Clark, 1988). Ovo povećava broj diferencijalnih jednačina za jednu, ali i dalje je ograničen broj diferencijalnih jednačina (Ong i Taaffe, 1988). Markovljevi sistemi čekanja se često opisuju generisanjem funkcija koje se mogu svesti na integralnu jednačinu ili formulacije koje uključuju modifikovane Beselove funkcije. Ovi pristupi evaluaciji su poznati kao poluanalitički i polunumerički (SASN) pristupi (Tan X i dr., 2013). Pregled i numeričko poređenje ranih SASN pristupa dali su Leese i Boyd (1966).

M/M/1 je najjednostavniji model redova čekanja i predstavlja specijalan model opšteg procesa „rađanja i umiranja” koji se koristi. U navedenom primeru „rađanje” predstavlja sinonim pristizanja klijenta u sistem, a „umiranje” odlazak klijenta iz sistema. M/M/1 je dobra aproksimacija za veliki broj redova čekanja. Ovi sistemi, kao što je već rečeno pretpostavljaju Poasonov proces prijema. Za sistem opsluživanja putno-pružnog prelaza je dobro izvršena aproksimacija jer su ispunjeni sledeći preduslovi:

- broj klijenata (učesnika u drumskom i železničkom saobraćaju) u sistemu je veoma veliki,
- uticaj jednog klijenta na performanse sistema je vrlo mali, odnosno jedan pojedinac troši veoma mali procenat sistemskih resursa,
- u teorijskom razmatranju predloženog modela svi klijenti su nezavisni, tj. njihove odluke o korišćenju sistema su nezavisne od drugih klijenata, itd.

U teoriji redova čekanja odnos intenziteta dolazaka i intenziteta opsluživanja predstavlja koeficijent iskorišćenja sistema (kanala) opsluživanja (eng. traffic intensity), odnosno:

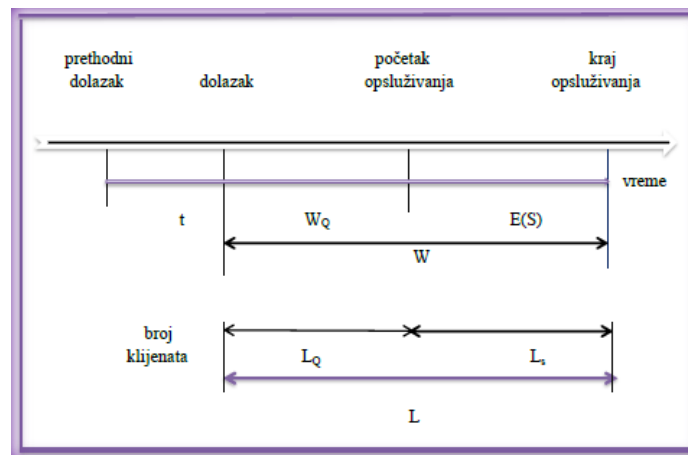
$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.43)$$

Parametar  $\rho$  predstavlja koeficijent iskorišćenosti kanala za opsluživanje. Kada posmatramo  $\rho < 1$  na modelu putno-pružnog prelaza, to znači da je intenzitet dolazaka manji od intenziteta izlazaka da bi se saobraćaj odvijao bez zastoja i zagušenja, u suprotnom,  $\rho \geq 1$  znači da je stopa dolazaka veća ili jednaka stopi izlazaka, red čekanja bi bio beskonačan i sistem ne bi bio stabilan.

Da bi sistem opsluživanja bio stabilan neophodan i dovoljan uslov je da je  $\rho < 1$ .

Osnovne veličine (slika br. 4.5) u sistemu opsluživanja po modelu M/M/1 su:

- $t$  – vreme između dolazaka (eng. interarrival time),
- $\lambda$  – intenzitet toka dolazaka jedinica (ili stopa dolazaka) – prosečan broj korisnika koji pristižu u jedinici vremena (eng. mean arrival rate),
- $\mu$  – intenzitet usluživanja (ili stopa opsluživanja) – prosečan broj korisnika koji mogu biti opsluženi u jedinici vremena (eng. mean service rate),
- $W_Q$  – prosečno vreme čekanja na opsluživanje (eng. average waiting time),
- $E(S)$  – prosečno vreme opsluživanja, gde je  $S$  vreme opsluživanja (eng. average service time),
- $W$  – prosečno vreme odziva ili prosečno vreme provedeno u sistemu opsluživanja (eng. average response time), uključuje vreme čekanja i vreme opsluživanja  $W = W_Q + E(S)$ ,
- $L$  – prosečan broj korisnika u sistemu opsluživanja (eng. average queue length) uključuje prosečan broj korisnika u redu i prosečan broj korisnika u procesu pružanja usluge  $L = L_Q + L_s$ ,
- $L_Q$  – prosečan broj korisnika u redu čekanja,
- $L_s$  – prosečan broj korisnika u procesu pružanja usluge.



Slika 4.5. Grafički prikaz osnovnih veličina u modelu opsluživanja M/M/1

#### 4.2.3.1. Little-ov zakon

Izraz  $L = \lambda W$  je poznat kao Little-ov zakon u literaturi redova. Ovaj zakon kaže da je broj klijenata u sistemu jednak prosečnom broju dolazaka korisnika u sistem pomnoženo sa prosečnim vremenom koje je serveru potrebno za opslugu jednog korisnika. Little-ov zakon se može primeniti

pojedinačno na različite delove reda, modele redova ili ceo sistem i predstavlja jedan od najkorisnijih rezultata u Teoriji masovnog opsluživanja.

Neka je  $L(x)$  broj korisnika u sistemu u trenutku  $x$  i neka je  $L$  prosečan broj prisutnih korisnika u sistemu, tokom vremenskog intervala  $[0, \infty)$ , koji je jednak:

$$L = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t L(x) dx \quad (4.44)$$

Neka je  $N(t)$  broj korisnika koji dođu u sistem u intervalu  $[0, t]$ . Prosečan broj pristiglih korisnika u sistem u jedinici vremena se označava sa  $\lambda$  i definiše :

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N(t)}{t} \quad (4.45)$$

Prosečno ukupno vreme koje korisnik provede u sistemu je:

$$W = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W(i), \quad (4.46)$$

gde je  $W(i)$  vreme koje  $i$ -ti klijent provede u sistemu i ukoliko  $\lambda$  i  $W$  postoje i konačni su, onda postoji i  $L$  i važi:

$$L = \lambda W \quad (4.47)$$

Ako sistem posmatramo dovoljno dugo, odnosno za  $t \rightarrow \infty$ , broj korisnika koji napuste sistem u jedinici vremena, jednak je broju korisnika koji uđu u sistem u jedinici vremena. Na osnovu toga, prosečan doprinos koji sistem ostvari od svakog korisnika u jedinici vremena iznosi  $\lambda W$  nekih vrednosnih jedinica. Kako sistem podjednako ostvaruje korist, bez obzira na način valorizacije od strane korisnika (da li u toku boravka u sistemu opsluživanja za svaku jedinicu vremena, ili na završetku opsluživanja), uvek važi rezultat iskazan formulom (4.47), odnosno  $L = \lambda W$ .

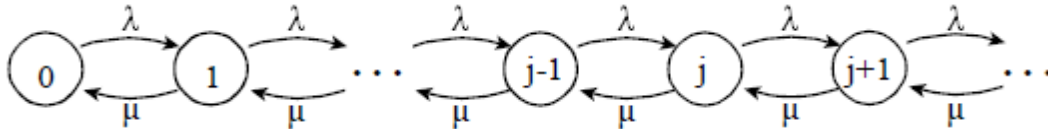
Od trenutka nastanka ovog tvrđenja, tačnije od prvog pojavljivanja Little-ove formule (1961. god.), mnogi matematičari su bezuspešno pokušavali da pojednostave navedeni dokaz koji je veoma komplikovan. Pored mnogih matematičara, William S. Jewell i Shaler Stidham su se takođe bavili dokazom ovog tvrđenja<sup>32</sup>.

Na osnovu Little-ove formule, moguće je prikazati vezu između očekivanog broja korisnika u redu i očekivane dužine vremena koju korisnik provede u redu od trenutka dolaska u sistem do momenta početka opsluživanja.

<sup>32</sup> Kompletan dokaz tvrđenja nazvanog Little-ov zakon, se nalazi u J.D.Little, A proof of the queueing formula  $L = \lambda W$ , Opns. Res., 9 (1961), 383-392.

#### 4.2.3.2. Formule za osnovne izlazne veličine modela M/M/1 sistema masovnog opsluživanja

Na slici br. 4.6. opisan je dijagram stanja sistema opsluživanja M/M/1 koji se sastoji od stanja (kružići) i dozvoljenih tranzicija između njih (linije sa strelicama), gde je prikazano da je za posmatrano stanje  $j$  sledeća pozicija u stanju ovog procesa iz  $j$  ili prelazi u susedno stanje  $j-1$  ili u  $j+1$  u zavisnosti da li je prethodna ili naredna slučajna promenljiva manja. Ovako definisani proces predstavlja homogeni proces Markova sa kontinuiranim vremenom.



Slika 4.6. Dijagram stanja sistema opsluživanja M/M/1

Vremensko ponašanje ovog dijagrama stanja opisano je u delu 4.1.3. ove disertacije jednačinom Čepmen – Kolmogorova i bez posebnog dokazivanja navešćemo osnovne formule za ovaj model (4.48a - 4.48j):

$$1) \quad \rho = 1 - p_0 \quad \text{verovatnoća da je sistem pun} \quad (4.48a)$$

$$2) \quad p_0 = 1 - \rho = 1 - \frac{\lambda}{\mu}, \quad \text{verovatnoća da je sistem prazan} \quad (4.48b)$$

$$3) \quad p_1 = \frac{\lambda}{\mu} \cdot p_0 = \rho \cdot p_0, \quad \text{verovatnoća da je u sistemu jedan klijent/korisnik} \quad (4.48c)$$

$$4) \quad p_2 = \frac{\lambda}{\mu} \cdot p_1 = \rho \cdot (\rho \cdot p_0) = \rho^2 \cdot p_0 = \rho^2 \cdot (1 - \rho), \quad \text{verovatnoća da su u sistemu dva klijenta/korisnika} \quad (4.48d)$$

$$5) \quad p_n = \rho \cdot p_{n-1}, \quad \text{verovatnoća da u sistemu ima n-klijenata}$$

$$6) \quad L_Q = \frac{\rho^2}{1-\rho}, \quad \text{prosečan broj korisnika u redu čekanja} \quad (4.48e)$$

$$7) \quad L_S = \rho, \quad \text{prosečan broj korisnika na opsluživanju} \quad (4.48f)$$

$$8) \quad L = \frac{\rho}{1-\rho}, \quad \text{prosečan broj korisnika u sistemu} \quad (4.48g)$$

$$9) \quad W = \frac{\rho}{(1-\rho)\lambda} = \frac{1}{(1-\rho)\mu}, \quad \text{prosečno vreme odziva ili prosečno vreme provedeno u sistemu opsluživanja} \quad (4.48h)$$

$$10) \quad W_Q = \frac{\rho}{(1-\rho)\mu}, \quad \text{prosečno vreme koje korisnik provede u čekanju} \quad (4.48i)$$

$$11) \quad E(S) = \frac{1}{\mu}, \quad \text{prosečno vreme opsluživanja u sistemu} \quad (4.48j)$$

### 4.3. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE)

Al-Seedy RO, Al-Ibraheem FM. New transient solution to the M/M/1 queue with varying arrival and departure rate. Applied Mathematics and Computation 2003; 135 (2–3): 425–428;



- Al-Seedy RO, El-Sherbiny AA, El-Shehawy SA, Ammar SI. The transient solution to a time-dependent single-server queue with balking. *The Mathematical Scientist* 2009; 34 (2): 113–118;
- Bookbinder JH, Martell DL. Time-dependent queueing approach to helicopter allocation for forest fire initial-attack. *INFOR* 1979;17 (1): 58–70;
- Bookbinder JH. Multiple queues of aircraft under time-dependent conditions. *INFOR* 1986; 24 (4): 280–288;
- Clarke AB. A waiting line process of Markov type. *The Annals of Mathematical Statistics* 1956; 27 (2): 452–459;
- Clark GM. Use of polya distributions in approximate solutions to nonstationary M/M/s queues. *Communications of the ACM* 1981; 24 (4): 206–217;
- Czachórski T, Nycz T, Pekergin F. Diffusion approximation models for transient states and their application to priority queues. *International Journal On Advances in Networks and Services* 2009; 2 (2 and 3): 205–217;
- El-Sherbiny AA. Transient solution to an infinite server queue with varying arrival and departure rate. *Journal of Mathematics and Statistics* 2010; 6 (1): 1–3;
- Escobar M, Odoni AR, Roth E. Approximate solution for multi-server queueing systems with Erlangian service times. *Computers & Operations Research* 2002; 29 (10): 1353–1374;
- E. Koenigsberg, Is queueing theory dead?, *Omega* Volume 19, Issues 2–3, 1991, 69-78, [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(91\)90017-N](https://doi.org/10.1016/0305-0483(91)90017-N);
- Gillard J, Knight V. Using singular spectrum analysis to obtain staffing level requirements in emergency units. *Journal of the Operational Research Society* 2014; 65 (5): 735–746;
- Green L, Kolesar P. The pointwise stationary approximation for queues with nonstationary arrivals. *Management Science* 1991; 37 (1): 84–97;
- Green L, Kolesar P, Svoronos A. Some effects of nonstationarity on multi-server Markovian queueing systems. *Operations Research* 1991; 39 (3): 502–511;
- Green LV, Kolesar PJ. On the accuracy of the simple peak hour approximation for Markovian queues. *Management Science* 1995; 41 (8): 1353–1370;
- Green LV, Kolesar PJ. The lagged PSA for estimating peak congestion in multiserver Markovian queues with periodic arrival rates. *Management Science* 1997; 43 (1): 80–87;
- Heragu, S.S. and S.R. Kakuturi (1997), Grouping and placement of machine *cells*, *IIE Transactions*, 29 (7), 561–571;
- Hillier S. Frederick, Lieberman J. Gerald (2001), *Introduction to Operations Research*, Seventh Edition; <https://catalog.libraries.psu.edu/catalog/2091516>
- Hinčin A.Ja: *Raboti po matematičkoj teoriji masovovo obsluživanja*, Moskva, 1966; [https://sr.wikipedia.org/wiki/Stohasti%C4%8Dki\\_proces](https://sr.wikipedia.org/wiki/Stohasti%C4%8Dki_proces) (link);

- Ilija Tanackov, Olegas Prentkovskis, Žarko Jevtić, Gordan Stojić and Pamela Ercegovic, A New Method for Markovian Adaptation of the Non-Markovian Queueing System Using the Hidden Markov Model, *Algorithms* 2019, 12 (7), 133; <https://doi.org/10.3390/a12070133>;
- Ingolfsson A, Haque AM, Umnikov A. Accounting for time-varying queueing effects in workforce scheduling. *European Journal of Operational Research* 2002; 139 (3): 585–597;
- Ingolfsson A, Akhmetshina E, Budge S, Li Y, Wu X. A survey and experimental comparison of service-level-approximation methods for nonstationary M(t)/M/s(t) queueing systems with exhaustive discipline. *INFORMS Journal on Computing* 2007; 19 (2): 201–214;
- Ivo Adan, Jacques Resing, *Queueing Systems*, Department of Mathematics and Computing Science, Eindhoven University of Technology, Eindhoven 2015;
- Jacquillat A, Odoni AR. Endogenous control of service rates in stochastic and dynamic queueing models of airport congestion. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 2015; 73: 133–151;
- Jung M, Lee ES. Numerical optimization of a queueing system by dynamic programming. *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 1989; 141 (1): 84–93;
- Jung W. Recoverable inventory systems with time-varying demand. *Production and Inventory Management Journal* 1993; 34 (1): 77–81;
- Justus Arne Schwarz, Gregor Selinka and Raik Stolletz (2016): Performance analysis of time-dependent queueing systems: Survey and classification *Omega* Volume 63, September 2016, 170-189: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.10.013>;
- J. D. Little, A proof of the queueing formula  $L = \lambda W$ , *Opns. Res.*, 9 (1961), 383-392;
- Karlin S. : *Osnovi teoriji slučajnih procesov*, Moskva, 1971;
- Kendall, D.G. (1951) Some problems in the theory of queues. *J. Roy. Statist. Soc.(B)* 13 (2), 151–185;
- Kendall, D.G. , *Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chain*, *Ann. Math. Stat.* 1953;
- Kofman A., Krjun R.: *Masovoe obsluživanje, teorija i priloženija*, Moskva, 1965;
- Kolesar PJ, Rider KL, Crabill TB, Walker WE. A queueing-linear programming approach to scheduling police patrol cars. *Operations Research* 1975; 23 (6): 1045–1062;
- Kolmogorov A. Sur le problème d'attente. *Matematicheskii Sbornik* 1931; 38 (1–2): 101–106 (in French);
- Koopman BO. Air-terminal queues under time-dependent conditions. *Operations Research* 1972; 20 (6): 1089–1114 (1931);
- Lau HC, Song H. Multi-echelon repairable item inventory system with limited repair capacity under nonstationary demands. *International Journal of Inventory Research* 2008; 1 (1): 67–92;

- Leese EL, Boyd DW. Numerical methods of determining the transient behaviour of queues with variable arrival rates. *Journal of the Canadian Operational Research Society* 1966; 4 (1): 1–13;
- Leese EL, Boyd DW. Numerical methods of determining the transient behaviour of queues with variable arrival rates. *Journal of the Canadian Operational Research Society* 1966; 4 (1): 1–13;
- Luchak G. The solution of the single-channel queuing equations characterized by a time-dependent Poisson-distributed arrival rate and a general class of holding times. *Operations Research* 1956; 4 (6): 711–73;
- Luchak G. The distribution of the time required to reduce to some preassigned level a single-channel queue characterized by a time-dependent Poisson-distributed arrival rate and a general class of holding times. *Operations Research* 1957; 5 (2): 205–209;
- Lyubarskii GY. Busy time of a nonstationary single-channel service system and related questions. *Automation and Remote Control* 1982; 43 (12): 1537–1543;
- Margolius BH. A sample path analysis of the  $M_t/M_t/c$  queue. *Queueing Systems* 1999; 31 (1–2): 59–93;
- Margolius BH. Transient solution to the time-dependent multiserver Poisson queue. *Journal of Applied Probability* 2005; 42 (3): 766–777;
- Margolius BH. Transient and periodic solution to the time-inhomogeneous quasi-birth death process. *Queueing Systems* 2007; 56 (3–4): 183–194;
- Margolius BH. The matrices  $R$  and  $G$  of matrix analytic methods and the time-inhomogeneous periodic quasi-birth-and-death process. *Queueing Systems* 2008; 60 (1–2): 131–151;
- Massey WA, Whitt W. Peak congestion in multi-server service systems with slowly varying arrival rates. *Queueing Systems* 1997; 25 (1–4): 157–172;
- Massey WA, Pender J. Gaussian skewness approximation for dynamic rate multi-server queues with abandonment. *Queueing Systems* 2013; 75 (2–4): 243–277;
- Nasr WW, Taaffe MR. Fitting the  $Ph_t/M_t/s/c$  time-dependent departure process for use in tandem queueing networks. *INFORMS Journal on Computing* 2013; 25 (4): 758–773;
- Nelson BL, Taaffe MR. The  $Ph_t/Ph_t/\infty$  queueing system: part I-the single node. *INFORMS Journal on Computing* 2004; 16 (3): 266–274 ;
- Novikov O.A. , Petuhov S.I., *Prikladnie voprosi teorii masovovo obsluživanja*, Moskva, 1969;
- Nozari A. Control of entry to a nonstationary queueing system. *Naval Research Logistics Quarterly* 1985; 32 (2): 275–286;
- Ong KL, Taaffe MR. Approximating nonstationary  $PH(t)/PH(t)/1/c$  queueing systems. *Mathematics and Computers in Simulation* 1988; 30 (5): 441–452;
- Parlar M. Optimal dynamic service rate control in time dependent  $M/M/S/N$  queues. *International Journal of Systems Science* 1984;15 (1): 107–118;

- Pender J. A Poisson–Charlier approximation for nonstationary queues. *Operations Research Letters* 2014; 42 (4): 293–298;
- Pender J. Gram charlier expansion for time varying multiserver queues with abandonment. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 2014; 74 (4): 1238–1265;
- Richard von Mises, *Mathematical Theory of Probability and Statistics*, Edited and Complemented by Hilda Geiringer Academic Press, New York/London (1964) DOI: <https://doi.org/10.1017/S0008439500029192>;
- Rider KL. A simple approximation to the average queue size in the time-dependent M/M/1 queue. *Journal of the ACM* 1976; 23 (2): 361–367;
- Rosenlund SI. Busy periods in time-dependent M/G/1 queues. *Advances in Applied Probability* 1976; 8 (1): 195–208;
- Rothkopf MH, Oren SS. A closure approximation for the nonstationary M/M/s queue. *Management Science* 1979; 25 (6): 522–534;
- Rothkopf MH, Johnston RG. Routine analysis of periodic queues. *IIE Transactions* 1982; 14 (3): 214–218;
- Stadje W. A note on the simple queue with variable intensities and two servers. *Operations Research Letters* 1990; 9 (1): 45–49;
- Taaffe MR, Ong KL. Approximating nonstationary Ph(t)/M(t)/s/c queueing systems. *Annals of Operations Research* 1987; 8 (1): 103–116;
- Taaffe MR, Clark GM. Approximating nonstationary two-priority non-pre-emptive queueing systems. *Naval Research Logistics* 1988; 35 (1): 125–145;
- Tan X, Knessl C, Yang YP. On finite capacity queues with time dependent arrival rates. *Stochastic Processes and their Applications* 2013; 123 (6): 2175–2227;
- Tipper D, Sundareshan MK. Numerical methods for modeling computer networks under nonstationary conditions. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 1990; 8 (9): 1682–1695;
- Van As HR. Transient analysis of Markovian queueing systems and its application to congestion-control modeling. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 1986; 4 (6): 891–904;
- Vukadinović S., Sučević D. : Slučajni procesi Markova i teorija masovnog opsluživanja u primeni na probleme saobraćaja, *Tehnika, Saobraćaj*, 10, 1970;
- Vukadinović, S. *Masovno opsluživanje*, Naučna knjiga, Beograd, 1988;
- Vukadinović S., J. Popović, *Matematička statistika*, Knjiga 2. izdanje, 2004;
- Zhang J, Coyle EJ. The transient solution of time-dependent M/M/1 queues. *IEEE Transactions on Information Theory* 1991; 37 (6): 1690–1696;
- Wragg A. The solution of an infinite set of differential-difference equations occurring in polymerization and queueing problems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 1963; 59 (01): 117–124.

## 5. RAZVOJ KOMPONENTI MODELA ZA PROCENU I KOMPARACIJU RIZIKA OD NASTANKA NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA U REPUBLICI SRBIJI

### 5.1. OPIS IZVORA PODATAKA

U ovom radu korišćeni su podaci o putno-pružnim prelazima i nezgodama i nesrećama iz baze podataka preduzeća „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. Predmet istraživanja ove disertacije čine 2128 putno-pružna prelaza u javnom saobraćaju, bez muzejsko-turističke železnice, sa evidentiranim nesrećama i nezgodama koje su se desile u periodu od 2007. do 2017. godine, na teritoriji Republike Srbije (bez Kosova i Metohije). Za novopredloženi model, korišćeni su podaci o stvarnom saobraćaju vozova iz realizovanog grafikona reda vožnje za predstavljene putno-pružne prelaze, a podaci o PGDS-u i frekvenciji drumskog saobraćaja dobijeni su aproksimacijom podataka iz baze brojanja saobraćaja upravljača puteva na posmatranim putno-pružnim prelazima (JP „Putevi Srbije” i lokalna samouprava).

U ovom delu je izvršen kratak opis podataka o putno-pružnim prelazima, njihovim osnovnim karakteristikama i opis evidentiranih nezgoda i nesreća, koje su korišćene za razvoj i prikaz modela za procenu i komparaciju rizika od nastanka nesreća i nezgoda<sup>33</sup>.

#### 5.1.1. Podaci o putno-pružnim prelazima

Baza podataka o broju posmatranih putno-pružnih prelaza preuzeta je od Sektora za građevinske poslove „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. sa zaključnim stanjem do kraja 2016. godine, kako je to detaljnije obrazloženo u uvodnom delu tač. 5.1. (sl. 5.1). U međuvremenu, jedan broj putno-pružnih prelaza je ukinut, manji broj je otvoren, a za određen broj prelaza je izvršeno podizanje stepena obezbeđenja, tako da u ovom momentu, navedene brojke na slici 5.2. mogu da se neznatno razlikuju, što ne implicira promene i ne utiče na konačne rezultate i zaključke u ovoj disertaciji. U delu 2.2. ovog rada navedeno je šest nivoa obezbeđenja i na slici 5.2. dat je tačan broj putno-pružnih prelaza za svaki vid obezbeđenja prelaza sa procentualnim učešćem u ukupnom broju. Znači, na posmatranom uzorku imamo:

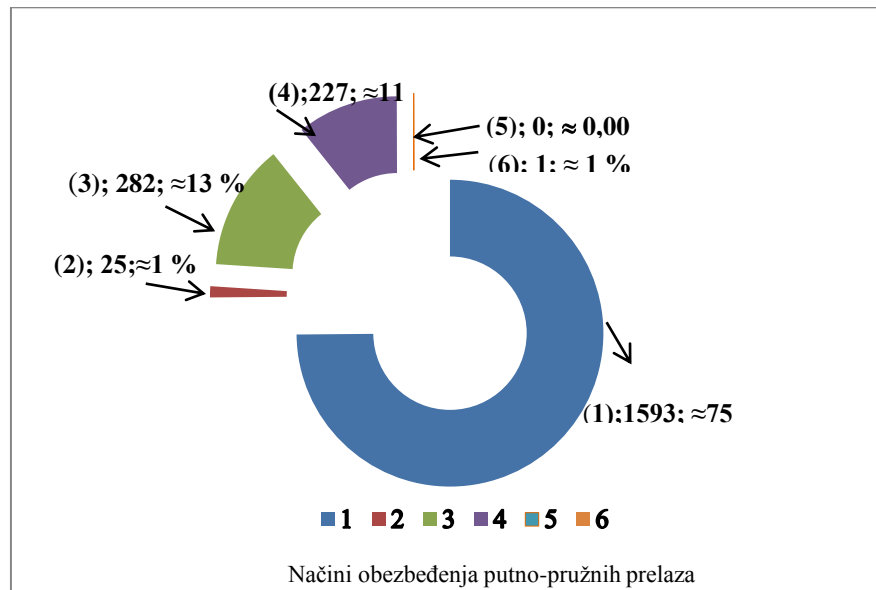
- 1593 putno-pružna prelaza obezbeđena saobraćajnim znacima na putu i zonom potrebne preglednosti, što čini blizu 75 % od ukupnog broja prelaza;
- 25 putno-pružnih prelaza obezbeđenih svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu, što čini blizu 1% od ukupnog broja prelaza;
- 282 putno-pružna prelaza obezbeđena automatskim polubranicima sa svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu, što čini blizu 13 % od ukupnog broja prelaza;

<sup>33</sup> Zbog boljeg prikaza i statističke obrade podataka u sledećoj tač. 5.2, uključeni su i dostupni podaci o nesrećama i nezgodama u 2017. godini zaključno sa mesecom novembrom.

- 227 putno-pružnih prelaza obezbeđenih branicima i saobraćajnim znacima na putu, što čini blizu 11 % od ukupnog broja prelaza;
- ni jedan putno-pružni prelaz sa neposrednim regulisanjem saobraćaja na putnom prelazu i posebnim merama (0 %);
- 1 putno-pružni prelaz obezbeđen zaštitnim ogradama i saobraćajnim znacima ili mimoilaznicama i saobraćajnim znacima na putnim prelazima za pešake i bicikliste, što čini blizu 1 % od ukupnog broja prelaza.

EVIDENCIJA PUTNIH PRELAZA NA TERITORIJI „INFRASTRUKTURE ŽELEZNICE SRBIJE“ a.d. prema Uredbi o kategorizaciji železničkih pruga Vlade Srbije													
Stanje na dan 15.10.2016.													
Broj pruge	Klasa pruge	Naziv pruge	ZOP	Broj koloseka na P.I	Širina P. P. u m	Površina putnog prelaza (m <sup>2</sup> )	Km položaj (na osovini puta)	Nadležna stanica	Način osiguranja*	Vrsta kolovoza**)	Ugao ukrštanja pruge i puta (u	Kategorija puta	Nosilac prava korišćenja
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Beograd	2	4.5	45.0	15+350.00	Zemun Polje	3	1	90	ulica	Sekretarijat za saobraćaj Dir. za puteve
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Beograd	2	4.5	45.0	17+329.00	Batajnica	3	2.5	90	nekategorisan	SO Zemun
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Beograd	2	4.5	45.0	18+797.00	Batajnica	1	2.5	90	nekategorisan	SO Zemun
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Beograd	4	7.5	135.0	20+994.00	Batajnica	3	1	90	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	6.0	50.96	26+682.00	Nova Pazova	3	4	90	nekategorisan	plan JP Stara Pazova*direkcija za izgradnj
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	7.0	68.6	34+696.00	Stara Pazova	3	4	90	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	7.0	68.6	46+228.00	Golubinci	3	1	90	lokalni	J.P.Dir za izgradnju Indija
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	7.0	68.6	51+049.00	otvorena pruga	3	4	62	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	6.0	50.96	53+436.00	Putinci	3	4	89	lokalni	JP za građ.zem. i puteve Ruma
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	6.0	50.96	57+352.00	otvorena pruga	1	4	75	nekategorisan	JP za građ.zem. i puteve Ruma
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	6.0	50.96	50+060.00	otvorena pruga	3	4	82	nekategorisan	JP za građ.zem. i puteve Ruma
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	9.0	84.28	52+008.00	otvorena pruga	3	4	60	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	5	8.0	175.7	55+687.00	Ruma	3	1	90	lokalni	JP za građ.zem. i puteve Ruma
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	6.0	51.0	59+458.00	otvorena pruga	1	5	90	nekategorisan	JP za građ.zem. i puteve Ruma
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	7.6	74.5	74+019.00	Voganj	3	1	60	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	6.0	51.0	76+983.00	otvorena pruga	1	5	90	nekategorisan	JP Dir.za izgr. opštine S.Mitrovica
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	7.5	73.5	80+740.00	Sremska	3	5	60	lokalni	JP Dir.za izgr. opštine S.Mitrovica
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	3	8.0	108.8	82+030.00	Sremska	3	5.1	90	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	9.8	107.8	84+091.00	Sremska	3	1	90	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	6.8	66.6	86+425.00	otvorena pruga	3	3a	90	ulica	JP Dir.za izgr. opštine S.Mitrovica
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	9.0	88.2	91+486.00	otvorena pruga	3	1	60	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	6.0	58.8	94+604.00	Martinci	3	5	90	nekategorisan	JP Dir.za izgr. opštine S.Mitrovica
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	5.2	51.0	95+809.00	otvorena pruga	1	5	90	nekategorisan	JP Dir.za izgr. opštine S.Mitrovica
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	5.2	51.0	97+785.00	otvorena pruga	1	5	90	nekategorisan	JP Dir.za izgr. opštine S.Mitrovica
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	7.7	75.5	99+549.00	otvorena pruga	3	1	90	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	5.2	51.0	00+205.00	otvorena pruga	1	5	90	nekategorisan	JP Dir.za izgr. opštine S.Mitrovica
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	4.0	39.2	00+849.00	otvorena pruga	1	5	90	nekategorisan	JP Dir.za izgr. opštine S.Mitrovica
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	7.8	76.4	03+287.00	otvorena pruga	3	1	60	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	5.2	51.0	05+400.00	Kukujevci	3	5	90	nekategorisan	Dir.za puteve SO Šid
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	5.2	51.0	09+280.00	otvorena pruga	3	5	90	nekategorisan	Dir.za puteve SO Šid
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	2	5.2	51.0	12+710.00	otvorena pruga	3	5	90	nekategorisan	Dir.za puteve SO Šid
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	6	9.0	225.0	16+105.00	Šid	3	1	90	državni put	JP "Putevi Srbije"
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	3	7.8	106.1	17+037.00	Šid	3	1	90	lokalni	Dir.za puteve SO Šid
1	MG	Beograd-Šid-Drž.gr.	Sr.Mitrovica	1	8.0	48.0	0+105.00	Sremska	3	5	90	državni put	JP "Putevi Srbije"

**Slika 5.1.** Izvod iz dela baze podataka, tačnije Evidencije putnih prelaza Sektora za građevinske poslove Beograd 2016.god. Izvor podataka „I.Ž.S” a.d.



**Slika 5.2.** Pregled ukupnog broja putno-pružnih prelaza u „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. 2017.godine sa različitim nivoima obezbeđenja

U korišćenju bazi podataka za sve putno-pružne prelaze, navedene su i ostale karakteristike, kao što su:

- broj i klasa pruge sa nazivom pruge na kojoj se putno-pružni prelaz nalazi<sup>34</sup>;
- pod nadležnošću koje sekcije za održavanje pruga se nalazi prelaz;
- broj koloseka, širina u m, površina u m<sup>2</sup> i km položaj putno –pružnog prelaza na pruzi;
- koja stanica je nadležna za navedeni prelaz, ili se isti nalazi na otvorenoj pruzi;
- način obezbeđenja prelaza prema tipovima obezbeđenja od 1 do 6, navedenim u tač. 2.2. ovog rada;
- vrsti kolovoza u području putno-pružnog prelaza: asfalt, armirano-betonske ploče, kamena kocka (sitna ili krupna), gumeni paneli, drveni pragovi i lomljeni kamen;
- ugao ukrštanja pruge i drumske saobraćajnice u stepenima, kategorije puta<sup>35</sup> i nosioca prava korišćenja, odnosno upravljača puta

<sup>34</sup> Uredbom o kategorizaciji železničkih pruga koje pripadaju javnoj železničkoj infrastrukturi „Službeni glasnik RS“, broj 92 od 29. juna 2020. godine, železničke pruge su podeljene, počev od broja 101 na magistralne, od broja 201 na regionalne, od broja 301 na lokalne, od broja 401 na manipulativne i od broja 501 na muzejsko-turističke pruge

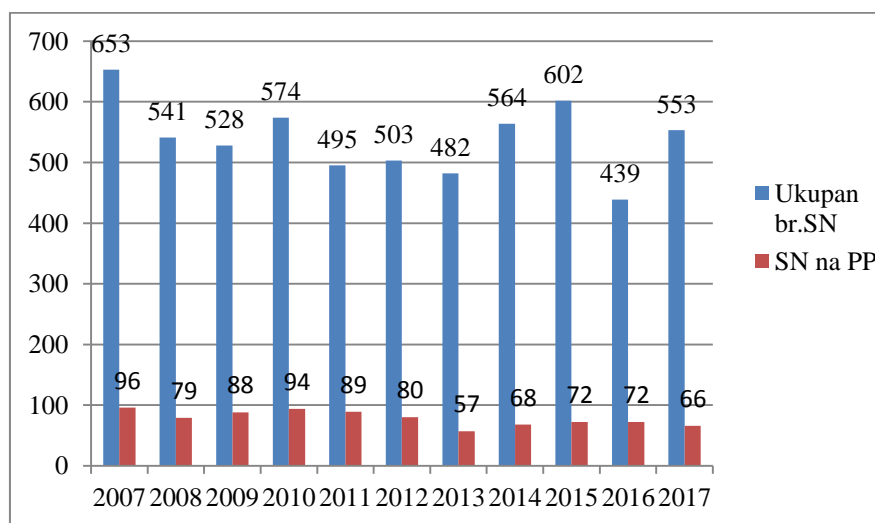
<sup>35</sup> Shodno Zakonu o putevima („Sl. glasnik RS”, br. 41/2018 i 95/2018 - dr. zakon) razmatrani su: državni putevi I i II reda, opštinski putevi, ulice i nekategorisani putevi.

### 5.1.2. Podaci o nesrećama i nezgodama

Podaci o nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima pribavljeni su iz saobraćajnih evidencija „Infrastruktura železnice Srbije” a.d., tačnije iz obrasca S-80 za posmatran period od 2007. do 2016. godine (i deo iz 2017. godine) za svaku godinu pojedinačno. Shodno odredbama [Pravilnika o prijavljivanju, istraživanju, evidentiranju, statističkom praćenju i objavljivanju podataka o nesrećama i nezgodama](#) („Službeni glasnik RS”, broj 32/2021 od 02.04. 2021. godine) upravljač javne infrastrukture i prevoznik vode evidencije o nesrećama i nezgodama u Knjizi evidencije nesreća i nezgoda, a statističko praćenje nesreća i nezgoda vode na obrascu Statistički izveštaj o nesrećama i nezgodama i navedeni izveštaj se mesečno i godišnje dostavlja Centru za istraživanje nesreća u saobraćaju na dalji postupak i rad <sup>36</sup>.

Baza podataka o nesrećama i nezgodama sadrži detaljno sve podatke o događaju i to:

- redni br. iz evidencije, datum, vreme, mesto dešavanja (stanica pod čijom nadležnošću se desila nesreća ili nezgoda), vrsta, uzrok;
- detaljan opis sa svim podacima o km položaju mesta nesreće, podaci o učesnicima drumskog saobraćaja (pol i starost), vrsti drumskog vozila i voza, vidljivosti itd.;
- broj usmrćenih, povređenih (putnika, železničara, trećih lica);
- visinu nastale štete, dužinu prekida saobraćaja;
- odgovornost, način i tačan datum okončanja.



**Slika 5.3.** Pregled odnosa ukupnog broja nesreća i nezgoda(SN) i broja nesreća i nezgoda (SN) koje su se desile samo na putno-pružnim prelazima za period 2007-2017.

<sup>36</sup> Nekadašnji S-80, novim Pravilnikom o prijavljivanju, istraživanju, evidentiranju, statističkom praćenju i objavljivanju podataka, zamenjen je Knjigom evidencija nesreća i nezgoda (prilog 2 navedenog pravilnika) dok se statistička obrada podataka o nesrećama i nezgodama vrši na novom obrascu (prilog 3 navedenog pravilnika).



Na slici 5.3. dat je pregled odnosa ukupnog broja nesreća i nezgoda (SN)<sup>37</sup> i broja nesreća i nezgoda (SN) koje su se desile samo na putno-pružnim prelazima za period od 01.01.2007. godine do 01.12.2017. godine.

U ovoj disertaciji, raspolagalo se sa podacima iz Izveštaja o nesrećama i nezgodama i korišćeni su podaci o karakteristikama putno-pružnih prelaza, koji čine dve zvanične baze podataka Akcionarskog društva za upravljanje javnom železničkom infrastrukturom „Infrastruktura železnice Srbije” sa stvarnim događajima, opisima lokacija i ostalim bitnim performansama za ovo istraživanje (slika 5.4).

Kvalitet i preciznost su uobičajeno ograničeni kvalitetom postojećih evidencija saobraćajnih nezgoda na putno-pružnim prelazima i njihovih posledica, jer osnovne baze podataka koje ima Ministarstvo unutrašnjih poslova, Agencija za bezbednost saobraćaja i upravljači puteva, u jednom manjem delu se razlikuju od evidencija o nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima koje ima Akcionarsko društvo za upravljanje javnom železničkom infrastrukturom „Infrastruktura železnice Srbije”<sup>38</sup>.

U novopredloženi modelu se analizira i teorijski razmatra slučaj pojave maksimalnog broja nezgoda i nesreća u uslovima nepostojanja bilo kakve regulacije prioriteta na putno-pružnom prelazu, gde nastanak haosa, predstavlja gornju granicu rizika od pojave nesreće ili nezgode, odnosno pojavu direktnog kontakta između železničkog i drumskog vozila-sudara.

---

<sup>37</sup> Za termin nesreće i nezgode u statističkoj analizi, paralelno je korišćen termin „saobraćajne nezgode- (SN)”

<sup>38</sup> Do razlike u evidentiranju broja saobraćajnih nezgoda na putno-pružnim prelazima prikazanih u studiji „Istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama pružnih prelaza” 2018. Agencije za bezbednost saobraćaja RS u tabeli 2.1. ovog rada, sa podacima prikazanim na slici br. 5.3. ovoga rada, došlo je iz razloga što „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. slučajevne sletanja, iskliznuća i sl. drumskih vozila u deo infrastrukturnog pojasa i područje putno-pružnog prelaza, ili eventualne međusobne konfliktno tokove drumskih vozila, bez posledica po železnički saobraćaj u smislu, većih obustava, kašnjenja, štete na infrastrukturnim kapacitetima i sl. ne svrstava u nesreće i nezgode (supstituisani pojam „vanredne događaje”). Ovakvi i slični slučajevi se vode kao protivpravne radnje prema „I.Ž.S.” a.d. izvršene od strane trećih lica. Iz navedenih razloga dolazi do razlika u broju saobraćajnih nezgoda na ukrštajima pruge i puta. U ovom doktorskom radu i modelu koji se predlaže, razmatraju se samo slučajevi kolizije dva konfliktna toka iz dva vida saobraćaja i kao relevantna baza podataka, korišćena je baza podataka o nesrećama i nezgodama iz evidencija „Infrastruktura železnice Srbije” a.d.

datum	vreme	mesto	vrsta	uzrok	kratak opis	usmrćeni			povređeno			pregaženo vozilo prelazni saobraćaj (CASOVA)	šteta (dinara)	odgovorni	okonačanje		
						putnika	železničara	trećih lica	putnika	železničara	trećih lica						
03.01.	15:46	Smederevo	29	58	Na PP u km.3+300 nalet voza 6761 na putničko vozilo							1			Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 12.03.2007.	
12.01.	15:20	Đunis	29	58	Na PP u km.199+970 nalet voza 46871 na putničko vozilo								1		Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 27.03.2007.	
12.01.	16:00	Pirot	19	58	Na PP u km.74+240 nalet voza 491 na bager							1	10,650.00		Nepažnja vozača bagera	a/a 09.02.2007.	
16.01.	08:20	Odžaci	19	58	Na PP u km.57+300 nalet voza 5430 na putničko vozilo									2,000.00	Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 12.03.2007.	
25.01.	16:08	Smederevo	19	58	Na PP u km.3+300 nalet voza 36758 (sama lok 641-324) na kamion							2	3	162,230.00	Nepažnja vozača kamiona	a/a 03.04.2007.	
27.01.	14:38	Čele Kula	32	58	Na PP u km.7+450 nalet voza 40771 na kamion								2		Nepažnja vozača kamiona	a/a 19.03.2007.	
24.02.	11:00	Raška	19	58	Na PP u km.148+332 nalet voza 3832 na fiću							1	1	1	Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 12.03.2007.	
28.02.	16:03	Lajkovac	19	58	Na PP u km.63+936 nalet voza 52161 na putničko vozilo			1					2		Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 16.04.2007.	
28.02.	20:08	Grijan (Vratarnica)	29	58	Na PP u km.93+500 nalet voza 45720 na putničko vozilo								2	3,000.00	Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 18.06.2007.	
01.03.	11:05	Doljevac	19	58	Na PP u km.6+600 nalet voza 37830 (TMD 25-008 i kola 31 72 392 4125-8 tov. skretnicom) na putničko vozilo							1	3		Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 30.03.2007.	
05.03.	11:13	Markovac	18	58	Na PP u km.99+949 nalet voza 334 na putničko vozilo							1	2	133,979.00	Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 24.04.2007.	
07.03.	19:50	Mladenovac	29	58	Na PP u km.51+800 došlo je do naleta NN putničkog vozila u lokomotivu 444-030 od voza										Nepažnja vozača drumskog vozila	a/a 17.03.2008.	
08.03.	08:10	Šabac (Šitar)	28	14	Na PP u km.8+151 nalet motornih pružnih kolica MPK (išla kao voz.65224) na putničko vozilo												a/a 18.06.2007.
10.03.	11:25	Lozovik - Saraorci	15	14	U km.24+730 neobezbeđen PP za prolaz voza 59931										Kvar elektronske kartice - nema odevornih	a/a 10.12.2007.	
12.03.	05:45	Adrani	19	58	Na PP u km.81+950 nalet voza 780 na putničko vozilo			1				1	2	2,000.00	Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 22.08.2007.	
13.03.	16:10	Pančevo Varoš	29	58	Na PP u km.0+906 ind. košeseka Rafinerija došlo je do naleta MS-1 na putničko vozilo										Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 24.04.2007.	
20.03.	20:18	Kragujevac	29	58	Na PP u km.30+820 nalet putn. vozila na voz 52997										Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 30.04.2007.	
26.03.	05:30	Guberevac	28	58	Na PP u km.59+247 pad putničkog vozila na prugu								1		Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 14.05.2007.	
28.03.	06:45	Subotica	15	14	U km.126+741 neobezbeđen PP za prolaz voza 6430; m.voda zaustavio voz ispred PP												a/a 22.08.2007.
28.03.	20:00	Leskovac	18	58	Na PP u km.288+608 nalet voza 341 na pešaka			1					2		Nepažnja trećeg lica	a/a 22.08.2007.	
17.03.	10:45	Raška	19	58	Na PP u km.156+503 nalet voza 3832 na traktor							1	1	23,046.85	Nepažnja vozača traktora	a/a 16.04.2007.	
07.04.	01:20	Sremska Mitrovica	32	58	Na PP u km.84+080 nalet voza 46177 na putničko vozilo								1		Nepažnja vozača drumskog vozila	a/a 18.06.2007.	
13.04.	20:15	Lapovo	29	58	Na PP u km.1+600 nalet voza 896 na kombi										Nepažnja vozača drumskog vozila	a/a 18.06.2007.	
21.04.	10:41	Naumićevo	15	14	U km.169+573 neobezbeđen PP za prolaz voza 52400												a/a 10.05.2007.
22.04.	09:23	Negotin	29	58	Na PP u km.173+422 nalet voza 53738 na putn. vozilo								2	1,042.10	Nepažnja vozača autobusa	a/a 26.07.2007.	
26.04.	21:13	Loznica	29	58	Na PP u km.38+900 nalet voza 55224 na autobus										Nepažnja vozača autobusa	a/a 26.07.2007.	
30.04.	16:25	Beograd	15	14	U km.1+660 neobezbeđen PP za prolaz voza 991												a/a 19.02.2008.
01.05.	17:25	Vršac	29	58	Na PP u km.79+997 nalet voza 2606 na putničko vozilo												a/a 18.06.2007.
04.05.	23:32	Pirot	29	58	Na PP u km.74+241 nalet voza 292 na putničko vozilo										Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 18.06.2007.	
12.05.	07:15	Mala Krsna	29	58	Na PP u km.67+750 nalet voza 46875 na traktor								2	14,200.00	Nepažnja vozača traktora	a/a 07.08.2007.	
17.05.	12:05	Medurovo	29	58	Na PP u km.253+700 nalet voza 45007 na putn. vozilo										Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 18.06.2007.	
21.05.	08:20	Grejač	28	58	Na PP u km.228+082 nalet voza 40771 na kamion										Nepažnja vozača kamiona	a/a 12.07.2007.	
26.05.	11:02	Palanka	18	58	Na PP u km.79+550 nalet voza 2902 na kamion								3	807,327.25	Nepažnja vozača kamiona	a/a 07.08.2007.	
28.05.	05:53	Vrbas	29	58	Na PP u km.41+650 nalet voza 6450 na putničko vozilo									24,000.00	Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 02.07.2006.	
31.05.	11:10	Zablaće	19	58	Na PP u km.97+810 nalet voza 34840 na traktor							1	2	52,400.00	Nepažnja vozača traktora	a/a 22.08.2007.	
05.06.	16:05	Knić (Gruža)	29	58	Na PP u km.53+750 nalet voza 53800 na traktor								1		Nepažnja vozača traktora	a/a 20.08.2007.	
12.06.	16:05	Kragujevac	29	58	Na PP u km.18+295 nalet voza 3814 na putničko vozilo								1		Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 16.07.2007.	
19.06.	07:40	Zmajevo	18	58	Na PP u km.99+047 nalet voza 541 na putničko vozilo							3	2		Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 16.07.2007.	
22.06.	09:05	Pančevo Varoš	29	58	Na PP u km.17+544 nalet voza 7014 na putničko vozilo										Nepažnja vozača putničkog vozila	a/a 22.08.2007.	
23.06.	12:30	Minićevo	29	58	Na PP u km.83+600 nalet voza 2743 na traktor										Nepažnja vozača traktora	a/a 17.07.2007.	

Slika 5.4. Izvod iz dela filtriranog S-80 za 2007. godinu, koji se odnosi na nesreće i nezgode samo na putno-pružnim prelazim. Izvor podataka „I.Ž.S.” a.d.<sup>39</sup>

<sup>39</sup> Shodno Zakonu o zaštiti podataka o ličnosti (Sl. gl. RS broj 87/2018 od 13.11.2018. godine) imena odgovornih lica su izuzeta u prikazu filtriranog izvoda

### 5.1.3. Podaci o frekvenciji drumskog i železničkog saobraćaja

Kao izvor podataka o frekvenciji drumskog i železničkog saobraćaja korišćeni su zvanični i dostupni podaci o prosečnom dnevnom godišnjem saobraćaju (PDGS) na državnim putevima prvog i drugog reda (izvor podataka JP „Putevi Srbije”)<sup>40</sup>, podaci dobijeni brojanjem saobraćaja na licu mesta i podaci o realizovanom redu vožnje (izvor „Infrastruktura Železnice Srbije” a.d. – stvarni grafikoni saobraćaja vozova).

Na slici broj 5.5. dat je izvod iz tabelarnog pregleda za 2013. godinu, koji se odnosi na PGDS na državnim putevima II reda.

---

<sup>40</sup> <https://www.putevi-srbije.rs/index.php/бројање-саобраћаја>

**МРЕЖА ДРЖАВНИХ ПУТЕВА II РЕДА  
РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ  
ПРОСЕЧАН ГОДИШЊИ ДНЕВНИ САОБРАЋАЈ - ПГДС  
У 2013. ГОДИНИ**

Ред. Број	Стара ознака пута	Ознака деонице	Саобраћајна деоница	Дужина деонице (км)	ПГДС							Напомена
					ПА	БУС	ЛТ	СТ	ТТ	АВ	Укупно	
<b>Број пута: 106</b>												
63	M-3	2027	Оџаци 1 (Бач) - Оџаци 2 (Деспотово)	0,3	Нема података - градска деоница							
64	M-3	2028	Оџаци 2 (Деспотово) - Кула 1 (Б. Паланка)	23,5	2 032	19	40	51	33	151	2 326	ABC 2024
<b>Број пута: 107</b>												
65	P-102	2152	Бач - Силбаш 2 (Кула)	22,5	696	5	12	10	14	33	770	ИНТ
66	P-102	2153	Силбаш 2 (Кула) - Силбаш 1 (Б.Паланка)	0,6	Нема података - градска деоница							II 105
66	P-102	2154	Силбаш 2 (Кула) - Руменка	25,6	4 825	35	62	67	96	229	5 334	ABC 2057
67	P-102	2155	Руменка - Нови Сад 1 (Б.Петровац)	7,4	14 443	105	246	201	288	686	15 969	ИНТ
<b>Број пута: 108</b>												
68	M-7	2058	Банатоко Карађорђево - Житиште	14,6	1 600	23	32	26	32	122	1 835	ABC 2081
69	M-7	2057	Житиште - Зрењанин 3 (Вршац)	15,1	4 618	41	75	74	51	193	5 052	ABC 2067
<b>Број пута: 109</b>												
70	P-123.1	2277	Житиште - Бегејци	6,2	1 365	30	17	10	11	10	1 443	ИНТ
71	P-123	2267	Бегејци - За Српски Итебеј	6,4	1 176	26	15	9	10	9	1 245	ИНТ
72	P-123	2266	За Српски Итебеј - Српски Итебеј	5,8	976	21	12	8	8	7	1 032	ИНТ
73	P-123.4	2281	Српски Итебеј - гр. Румуније (Међа)	11,9	229	5	3	2	2	2	243	ИНТ
<b>Број пута: 110</b>												
74	P-110	2205	Каћ - Шајкаш	15,0	1 742	24	41	50	26	64	1 947	ИНТ
75	P-110	2206	Шајкаш - Перлез 1 (Шајкаш)	31,8	2 230	32	52	64	33	82	2 493	ABC 2004
	M-24.1	2144	Перлез 1 (Шајкаш) - Перлез 2 (Ковачица)	2,5	3 303	115	56	94	45	351	3 964	I6 11
76	P-110	2207	Перлез 2 (Ковачица) - Ковачица	21,4	1 358	21	34	56	32	105	1 606	ИНТ
77	P-110	2208	Ковачица - Падина	9,7	882	12	21	20	24	30	989	ИНТ
78	P-110.1	2210	Падина - Самош	14,0	491	8	11	14	7	18	549	ИНТ
79	P-123	2271	Самош - Неузина	13,9	548	8	12	16	8	20	612	ИНТ
80	P-123.3	2280	Неузина - Сечањ 2 (Неузина)	4,6	722	10	17	21	11	26	807	ИНТ
	M-7.1	2064	Сечањ 2 (Неузина) - Сечањ 1 (Јаша Томић)	1,4	Нема података - градска деоница							I6 20
81	P-123.6	2282	Сечањ 1 (Јаша Томић) - Јаша Томић	11,9	887	13	21	25	13	32	991	ИНТ
82	P-123.2	2279	Јаша Томић - гр. Румуније (Ј.Томић)	2,7	41	0	1	1	0	0	43	ПАС
<b>Број пута: 111</b>												
83	M-24	2138	Бчка - Ковачица	34,0	610	1	14	15	32	43	715	ABC 2032
84	M-24	2139	Ковачица - Јабука	25,5	3 672	69	62	93	36	365	4 297	ABC 2071
85	M-24	2140	Јабука - Панчево 3	5,3	7 981	150	135	202	78	793	9 339	ПАС
86	M-24	0661/0662	Панчево 3 - Панчево 2	1,3	Нема података - градска деоница							
<b>Број пута: 112</b>												
87	M-7.1	2067	Уљма - Стража	15,9	1 394	22	30	19	36	40	1 541	ABC 2008
88	M-7.1	2068	Стража - Бела Црква	17,1	1 725	26	37	24	45	50	1 907	ПАС
89	M-7.1	2069	Бела Црква - гр. Румуније (Калуђерово)	11,4	473	0	6	2	4	6	491	ABC 2012
<b>Број пута: 113</b>												
90	P-115	2226	Ковин 2 (Делиблато) - Врачев Гај	35,6	2 363	9	48	65	47	127	2 659	ABC 2013
91	P-115	2227	Врачев Гај - Бела Црква	5,5	2 090	9	30	50	30	75	2 284	ИНТ
<b>Број пута: 114</b>												
92	P-126	2286	Вршац - Стража	17,5	1 290	5	29	36	30	95	1 485	ИНТ
<b>Број пута: 115</b>												
93	P-103	2156	гр. Хрватске (Товарник) - Шид	5,4	951	11	15	16	13	246	1 252	ABC 2074
94	M-18.1	2087	Шид - Адашевици	9,0	1 671	16	22	37	28	412	2 186	ABC 2025
95	P-128	2289	Адашевици - гр. Хрватске (Јамена)	24,7	566	5	8	13	10	139	741	ИНТ
<b>Број пута: 116</b>												
96	P-107	2194	гр.Хрватске (Нештин) - Свилош	13,3	729	11	10	6	7	30	793	ПАС
97	P-107	2195	Свилош - Раковац	17,9	5 504	92	74	46	51	223	5 990	ABC 2054
98	P-107	2196	Раковац - Нови Сад 7 (Беоцин)	11,7	13 076	271	168	109	110	648	14 382	ИНТ
<b>Број пута: 117</b>												
99	M-18.1	2086	гр. Хрватске (Сот) - Шид	12,2	691	12	9	6	6	28	752	ПАС
100	P-103	2157	Шид - Кукујевци	11,9	2 374	23	34	31	26	121	2 609	ИНТ
101	P-103	0841	Кукујевци - Кузмин 1 (аутопут)	4,2	2 441	25	33	32	26	131	2 688	ИНТ
	P-103	0842	Кузмин 1 (аутопут) - Кузмин 3 (С.Митровица)	2,6	2 750	35	30	35	25	175	3 050	I6 29
102	P-103	2159	Кузмин 3(С.Митровица) - С.Митровица 2(Баноштар)	18,3	2 539	28	36	33	28	157	2 821	ИНТ

**Slika 5.5.** (Print Screen izvoda iz tabelarnog pregleda za 2013. godinu, koji se odnosi na PGDS na državnim putevima II reda ). Preuzeto sa linka: <https://www.putevi-srbije.rs/index.php/бројање-саобраћаја>

## 5.2. STATISTIČKA ANALIZA SAOBRAĆAJNIH NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA „INFRASTRUKTURA ŽELEZNICE SRBIJE” a.d. U PERIODU OD 2007. DO 2017. GODINE

Na svim aktivnim putnim prelazima „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. u periodu 2007-2017. godine (zaključno sa mesecom novembrom) realizovalo se 625 saobraćajnih nesreća i nezgoda. U grupu učesnika se ubrajaju pešaci, zaprežna kola, biciklisti, putnička vozila, kamioni, autobusi, radne mašine – pretežno traktori sa neznatnim učešćem kombajna i bagera, i u jednom slučaju radna mašina preduzeća za održavanje puteva (mašina za asfaltiranje).

Najzastupljenija grupa učesnika nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima su putnička vozila sa 79.84%. Broj poginulih i povređenih je proporcionalan učešću. Za bicikliste, vozače motora, zaprežna vozila, autobuse, kamione i traktore (radne mašine) možemo zaključiti da su broj poginulih i povređenih na putno-pružnim prelazima proporcionalni učešću u saobraćajnim nesrećama i nezgodama<sup>41</sup>.

Najugroženija grupa su pešaci koji sa ukupnim učešćem od 3.68% imaju disproportionalno učešće među poginulim učesnicima nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima od 12.50% (svaka druga nezgoda je fatalna). Suprotno, u grupi vozila u kojoj dominiraju traktori (pored dva slučaja kombajna, jednog slučaja bagera i jednog slučaja mašine za asfaltiranje) sa učešćem od 9.12% (ukupno 57) ima svega 4 poginula ili 4.16%. Ishod treba uvažiti uz činjenicu da se 50 nesreća i nezgoda realizovalo na putno-pružnim prelazima sa najnižim nivoom osiguranja: saobraćajnim znacima na putu i zonom potrebne preglednosti - na nekategorisanim i seoskim putevima!

U narednoj tabeli je dat prikaz učesnika i raspodela, sa ishodom. Ukupan broj poginulih je 96, a povređenih 218.

**Tabela 5.1.** Raspodele učesnika i ishodi nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. u periodu 2007-2017. Godine

Učesnici u nesrećama i nezgodama	Pešak	Bicikl	Motor	Zapreaga	Putničko vozilo	Autobus	Kamion	Traktor
Broj i zastupljenost nesreća i nezgoda	23 3.68%	4 0.64%	7 1.12%	2 0.32%	512 79.84%	9 1.44%	24 3.84%	57 9.12%
Poginuli	12 12.50%	1 1.04%	2 2.08%	0 0.00%	74 77.08%	0 0.00%	3 3.12%	4 4.16%
Povređeni	11 5.04%	2 0.91%	2 0.91%	0 0.00%	164 75.22%	5 2.29%	12 5.50%	22 10.09%

<sup>41</sup> Naročito zapažanje: U periodu od 2012. do 2017. godine je evidentirana 21 nesreća i nezgoda u kojoj je putničko vozilo naletelo na voz tokom kretanja preko putno-pružnog prelaza.

Iz ukupnog skupa od 2128 putno-pružnih prelaza, 625 saobraćajnih nesreća i nezgoda u posmatranoj dekadi se realizovalo na 385 putnih prelaza i na svega 18.08%. Ovaj podatak treba uzeti sa obaveznom rezervom zbog smanjenog obima saobraćaja na prugama Bečej-Senta, Bečej-Vrbas, Vladimirovac-Kovin, Čoka-Kneževac, Sombor-Bački Breg, Sombor-Ridica i Paraćin-Stari Popovac.

Zbog toga, na prugama „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. možemo smatrati aktivnim 1928 putnih prelaza, ili 90.60% putno-pružnih prelaza.

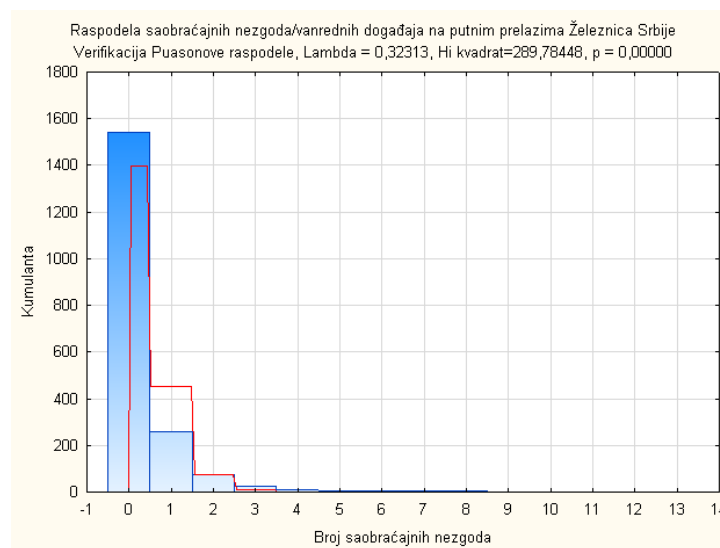
Raspodela saobraćajnih nesreća i nezgoda na aktivnim putnim prelazima nije verifikovana očekivanom *Poisson*-ovom raspodelom. Parametri raspodele nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima imaju matematičko očekivanje od  $\mu = 0.32313$  i standardnu devijaciju  $\sigma = 0.87093$ . Količnik odnosa standardne devijacije i matematičkog očekivanja, koeficijent varijacije, iskazuje izraziti varijabilitet (5.1):

$$c = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{0.87093}{0.32313} = 2.69529 \quad (5.1)$$

Ova vrednost je značajno veća od koeficijenta varijacije za slučaj *Poisson*-ove raspodele za osnovni parametar  $\lambda = \mu = 0.32313$ :

$$c_{Poisson} = \frac{\sqrt{\lambda}}{\lambda} = 1.75918 \quad (5.2)$$

Nesignifikantna verifikacija Poasonove raspodele ima izuzetno visoku vrednost Hi-kvadrat testa  $\chi^2 = 289.78$  (slika 5.6.)



**Slika 5.6.** Verifikacija nesignifikantne *Poisson*-ove raspodele saobraćajnih nezgoda na putnim prelazima „Infrastruktura železnice Srbije” a.d.

Odsustvo Poasonove raspodele u osnovnom skupu određuje odsustvo eksponencijalno raspodeljenog vremena između vremenski uzastopnih saobraćajnih nesreća i nezgoda na svim putno-pružnim prelazima „Infrastruktura železnice Srbije” a.d.

Odsustvo osobine „bezposledičnosti”, obavezne osobine eksponencijalne raspodele direktno nas upućuje na uticaj jednog ili više faktora na pojavu saobraćajnih nesreća i nezgoda.

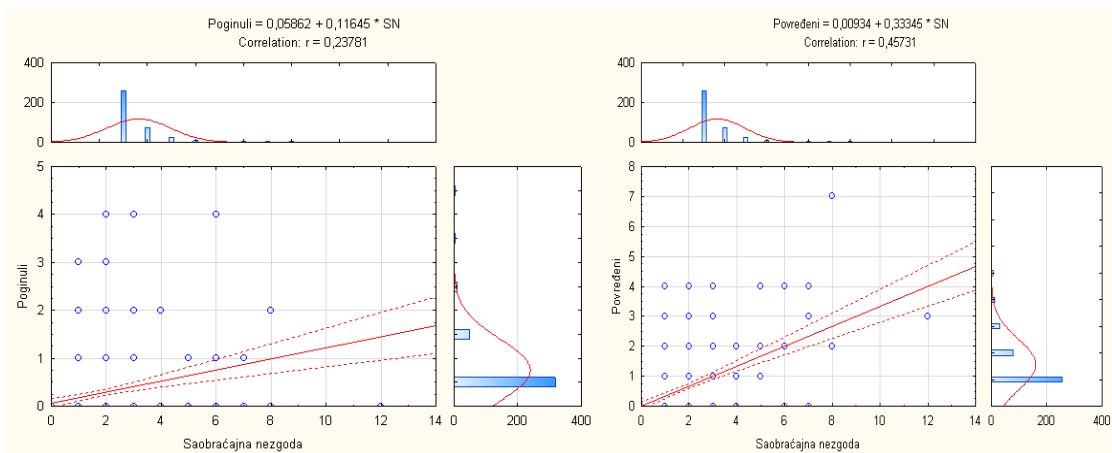
U prilog ovoj hipotezi navodimo 11 kritičnih putnih prelaza (0.57% putnih prelaza) na kojima je u analiziranom periodu realizovano 82 (13.12%) saobraćajnih nesreća i nezgoda.

**Tabela 5.2.** Pregled kritičnih putno-pružnih prelaza

	Pruga	Stacionaža	Lokacija	Br. SN
1	Beograd Centar-Vršac-drž. gr.	17+545	Pančevo	12
2	Ruma-Šabac-rasp.D.Borina-drž. gr.	4+038	Šabac	8
3	Novi Sad-Bogojevo	57+306	Odžaci	8
4	Niš-Dimitrovgrad dr. gr.	74+243	Pirot	8
5	Ruma-Šabac-rasp.D.Borina-drž. gr.	3+285	Buđanovci	8
6	Stalać-Kraljevo-Požega	41+715	Trstenik	7
7	Ruma-Šabac-rasp.D.Borina-drž. gr.	49+004	Loznica	7
8	Ruma-Šabac-rasp.D.Borina-drž. gr.	36+390	Loznica	6
9	Beograd-Šid-drž. gr.	62+008	Kraljevci (Ruma)	6
10	Lapovo-Kraljevo-Gen. Janković-dr. gr.	30+832	Kragujevac	6
11	Lapovo-Kraljevo-Gen. Janković-dr. gr.	93+138	Konarevo	6

Bilans saobraćajnih nesreća i nezgoda je iznosio 96 poginulih i 218 povređenih učesnika. Na 67 putnih prelaza je registrovano 96 poginulih učesnika, a na 130 putnih prelaza je registrovano 218 povređenih učesnika u registrovanim nesrećama i nezgodama. Od toga su 22 putno-pružna prelaza imala poginule i povređene učesnike saobraćajnih nezgoda. Saobraćajne nesreće i nezgode sa poginulim i povređenim su realizovane na 175 putno-pružnih prelaza.

Kumulativni bilans težine ishoda saobraćajnih nesreća i nezgoda nije u izraženoj korelaciji sa brojem nesreća i nezgoda. Karakterističan primer je upravo putno-pružni prelaz koji je u posmatranom periodu imao najveći broj saobraćajnih nesreća i nezgoda (na pruzi Beograd centar-Vršac- drž. gr. stacionaža u km 17+545). U 12 saobraćajnih nezgoda na ovom putnom prelazu nije bilo poginulih sa „svega” 3 povređena učesnika. Koeficijent linearne korelacije saobraćajnih nezgoda i broja poginulih se može deklarirati kao slab sa vrednošću  $\rho=+0.23$ , a koeficijent linearne korelacije saobraćajnih nezgoda i broja povređenih se može deklarirati kao umeren sa vrednošću  $\rho=+0.45$ .



**Slika 5.7.** Linearna korelacija poginulih i povređenih učesnika u saobraćajnim nezgodama na putno-pružnim prelazima

Komplementarno, na 210 putnih prelaza realizovano je 265 saobraćajnih nezgoda koje nisu imale posledica po život i zdravlje učesnika.

Ovakav rezultat možemo pripisati dobro predviđenim ograničenjima brzina u zonama rizičnih putnih prelaza, kao i savesnosti mašinovođa, koji su na vreme uočavali opasnost i zavodili kočnja tako da se ostvareni kontakt realizovao pri brzinama železničkih vozila koje nisu bile pogubne. Takođe, evidentna je adaptacija svih učesnika na rizične putne prelaze (posebno sa prvim nivoom osiguranja na nekategorisanim putevima).

U tabeli 5.3. su dati podaci dvodimenzionalne raspodele broja saobraćajnih nezgoda na putno-pružnim prelazima „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. u periodu od 2007. do 2017. godine marginalnih nezavisnih promenljivih: meseci u godini i časovi u danu.

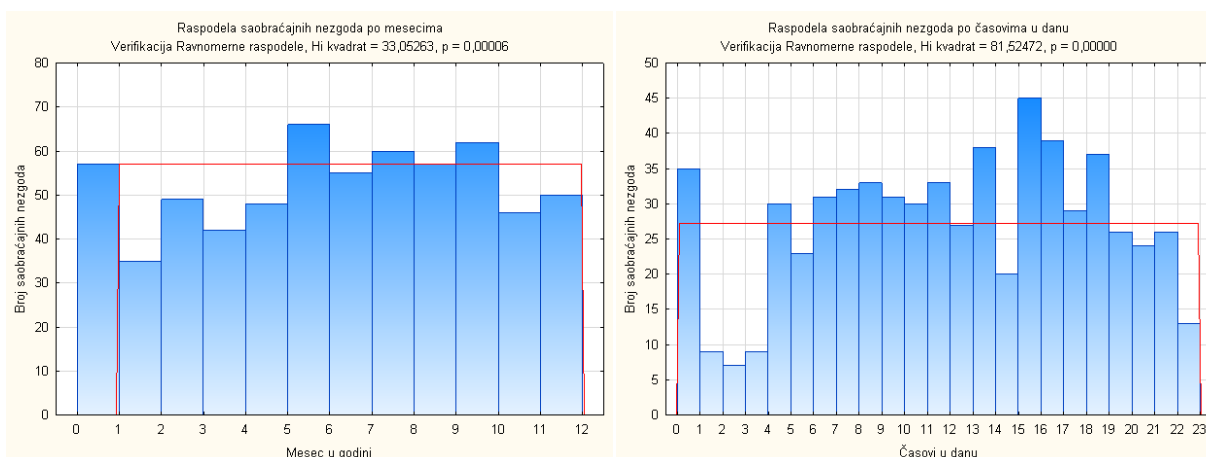
**Tabela 5.3.** Raspodela saobraćajnih nezgoda na putnim prelazima u funkciji meseca u godini i časova u danu

		MESECI U GODINI											
		Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Jun	Jul	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.
ČASOVI U DANU	0	3	1	0	0	2	3	1	2	2	0	2	0
	1	4	0	1	2	1	0	1	2	3	1	2	2
	2	0	0	1	0	2	1	1	2	1	1	0	0
	3	1	1	1	3	0	0	0	0	0	1	0	0
	4	1	1	1	0	0	0	2	1	1	2	0	0
	5	3	3	2	0	4	5	1	2	2	3	1	4
	6	1	0	1	0	0	3	3	3	7	2	2	1
	7	0	0	2	3	2	2	5	2	3	3	3	6
	8	3	1	2	3	2	6	1	6	1	4	1	2
	9	4	1	3	3	2	5	1	3	1	4	3	3
	10	2	1	2	3	2	1	7	3	2	5	1	2
	11	2	3	6	0	2	6	2	3	1	0	4	1
	12	6	3	1	0	5	1	1	5	5	2	1	3
	13	3	4	3	2	2	4	3	1		2	0	3
14	4	1	0	3	2	5	5	2	3	5	4	4	



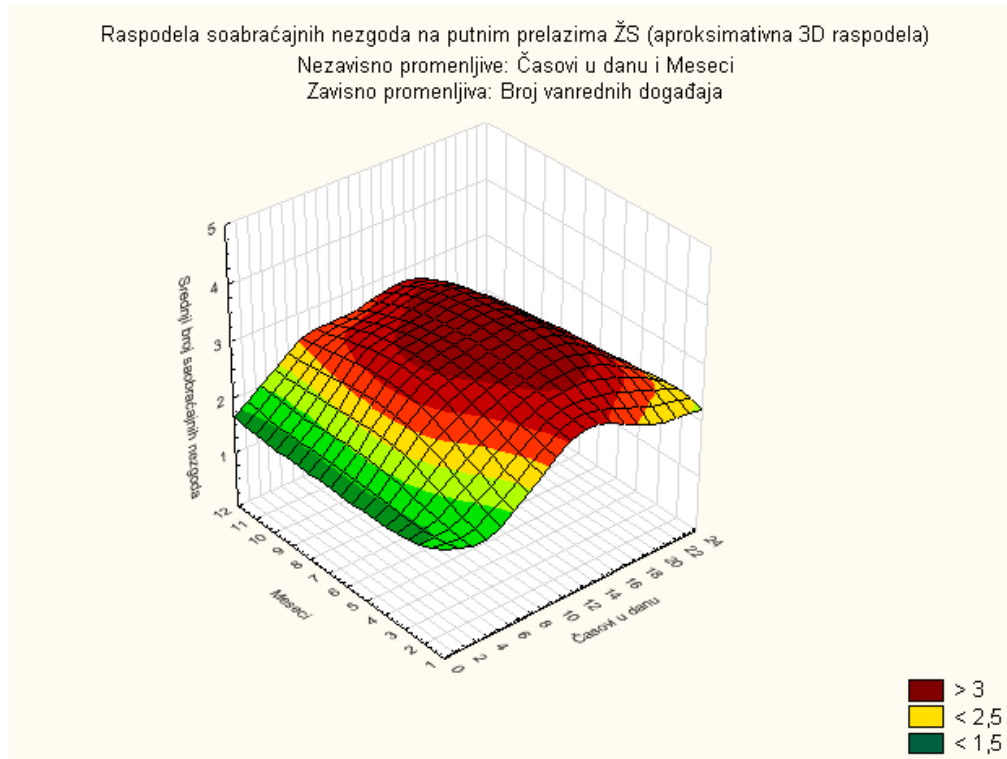
15	2	1	0	0	0	3	1	3	1	6	1	2
16	3	6	3	4	3	7	3	3	4	4	4	2
17	2	2	2	2	9	3	3	2	6	4	2	2
18	2	2	1	2	1	1	1	6	3	1	4	5
19	2	3	8	3	6	1	4	1	2	3	2	2
20	2	1	3	4	0	2	0	2	2	3	4	3
21	2	0	1	2	0	3	4	3	3	4	1	1
22	2	0	5	3	1	2	3	3	2	1	2	2
23	3	0	0	0	0	2	2	0	2	1	3	0

Marginalne raspodele saobraćajnih nezgoda nisu ravnomerno raspodeljene. Za obe nezavisne promenljive prag značajnosti je zanemarljiv. Histogrami raspodele, vrednosti hi-kvadrat testa i prag značajnosti su dati na slici 5.8.



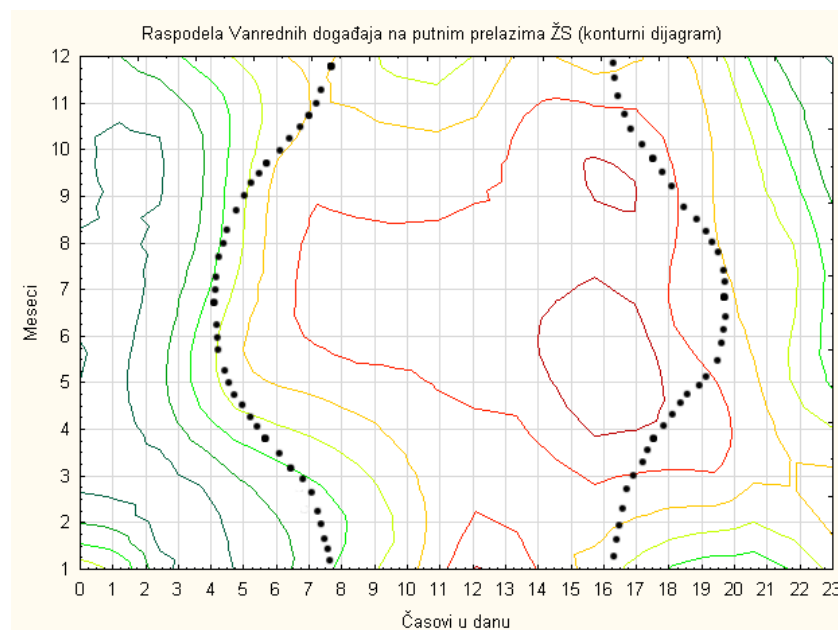
**Slika 5.8.** Neravnomerne raspodele saobraćajnih nesreća i nezgoda po mesecima u godini i časovima u danu

Na slici 5.9. je prikazana aproksimativna dvodimenzionalna raspodela podataka slučajne promenljive saobraćajnih nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima iz tabele 5.3. za nezavisne promenljive: časovi u danu i mesec u godini. Aproksimacija je izvršena metodom najmanjih kvadrata. Ova raspodela predstavlja konvoluciju deklariranih nezavisnih slučajnih promenljivih. Raspodela ima uočljiv maksimum broja saobraćajnih nesreće i nezgoda u popodnevnom časovima letnjih meseci.



**Slika 5.9.** Aprosimativni grafik broja saobraćajnih nezgoda u funkciji meseca u godini i časa u danu

Preciznije određivanje kritičnog perioda se može uočiti sa konturnog dijagrama (slika 5.10). Na ovom prikazu su dodate astronomske granice dana i noći na području Republike Srbije.



**Slika 5.10.** Konturni dijagram broja saobraćajnih nesreća i nezgoda u funkciji meseca u godini i časa u danu sa naglašenom astronomskom granicom dana i noći

Srednji broj saobraćajnih nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima ima dva lokalna maksimuma broja saobraćajnih nesreća i nezgoda. Prvi maksimum broja saobraćajnih nesreća i nezgoda se nalazi u intervalu od 14 do 18 časova, u vidnom delu dana tokom meseci: aprila, maja i juna. Drugi maksimum broja saobraćajnih nesreća i nezgoda se nalazi u intervalu od 15 do 17 časova, u vidnom delu dana, pretežno tokom meseca septembra.

Analiza varijanse je potvrdila statističku signifikantnost grafički istaknutih i maksimuma. U navedenim periodima srednji broj saobraćajnih nesreća i nezgoda na putnim prelazima je iznosio 3.4667, a u komplementarnom periodu srednji broj saobraćajnih nesreća i nezgoda je iznosio 2.1062. Razlika između navedenih srednjih vrednosti je statistički značajna sa pragom značajnosti  $r=0.002330$ . Ovakav rezultat je verovatan ishod prostorne pokretljivosti stanovništva dve aktivnosti javnog i privatnog tržišta rada: povratak sa posla i nastavak poljoprivrednih aktivnosti. Ove dve migracije značajno povećavaju intenzitet tokova drumskog saobraćaja i prostornog odnosa drumske i železničke saobraćajne mreže, tj. opterećenje putno-pružnih prelaza. Povećanje frekvencije neminovno dovodi do statistički signifikantnog povećanja saobraćajnih nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima u evidentiranim periodima.

Na 214 putno-pružna prelaza pod nadzorom JP „Putevi Srbije” prosečan broj saobraćajnih nezgoda u periodu od 2007. do 2017. godine je iznosio 0.57353, a na svim ostalim putnim prelazima je iznosio 0.29350. Analizom varijanse je takođe potvrđena signifikantna statistička razlika između proračunatih vrednosti, sa pragom značajnosti  $r=0.000021$ . Putno-pružni prelazi pod nadzorom JP „Putevi Srbije” su dominantno na nivou osiguranja sa polubranicima (sa svetlosnim saobraćajnim znacima na putu) i branicama (i saobraćajnim znacima na putu). Međutim, putni prelazi pod nadzorom JP „Putevi Srbije” su takođe na putevima višeg ranga (državnim putevima) koji su opterećeni dominantnim tokovima drumskog saobraćaja.

U podskupu putnih prelaza sa poginulim i povređenim učesnicima saobraćaja, faktor ranga puta na kojem se putni prelazi nalazi ne daje statistički značajnu razliku između srednjih vrednosti poginulih u saobraćajnim nesrećama ( $r=0.1105$ ). Između srednjih vrednosti povređenih u saobraćajnim nesrećama takođe nije bilo statistički značajne razlike ( $r=0.4642$ ). Srednji broj poginulih i povređenih u saobraćajnim nesrećama na putnim prelazima na klasifikovanim putevima su dati u tabeli 5.4.

**Tabela 5.4.** Srednji broj poginulih i povređenih na prelazima puteva različitog ranga<sup>42</sup>

Rang puta putnog prelaza PP	Nekategorisa ni i seoski PP	PP lokalnim putevi	na državnim regionalni	na i ulicama	PP u gradskim
Srednji broj poginulih	0.1607	0.2631	<b>0.4225</b>		0.2708
Srednji broj povređenih	0.4523	0.6526	0.5774		0.6667

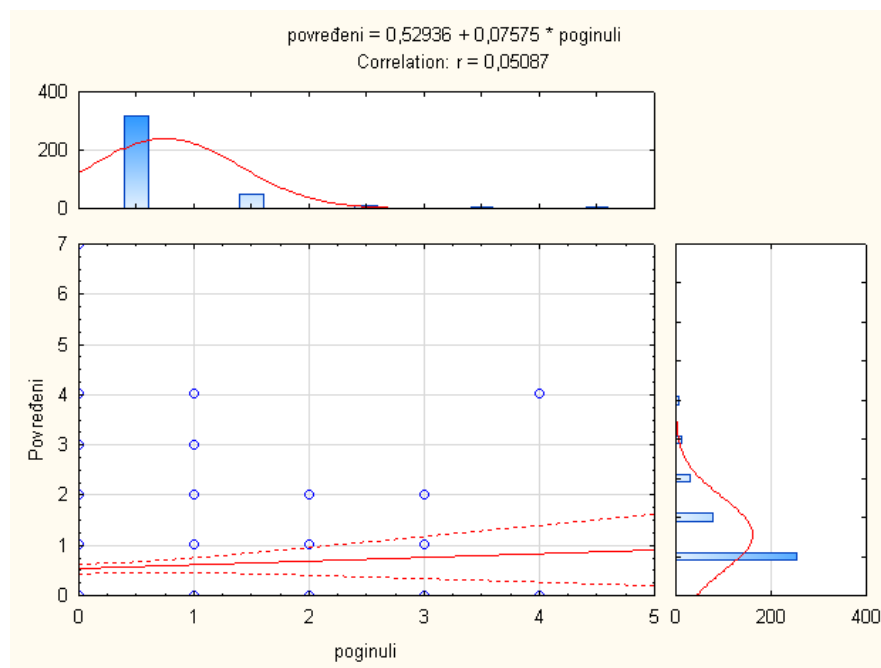
<sup>42</sup> Napomena: Na biciklističko-pešačkim putnim prelazima nije bilo nastradalih

Uticaj faktora nivoa osiguranja putnog prelaza ima statistički značajnu razliku u srednjim vrednostima za nivo osiguranja 3, sa polubranicima i svetlosnim saobraćajnim znacima na putu ( $r=0.0034$ ). Za srednji broj povređenih, postoji visoka statistička saglasnost za sve nivoe osiguranja ( $r=0.9278$ ). Srednji broj poginulih i povređenih u saobraćajnim nesrećama na putnim prelazima različitog nivoa osiguranja su dati u tabeli 5.5.

**Tabela 5.5.** Srednji broj povređenih i poginulih na putno-pružnim prelazima različitog nivoa osiguranja

Nivo osiguranja	1	2	3	4
Sr. br. poginulih	0.1673	0.2000	0.4423	0.2187
Sr. br. povređenih	0.5690	0.4000	0.5192	0.5312

Generalno, korelacija između broja poginulih i povređenih na putnim prelazima je izuzetno slaba i iznosi svega  $\rho=0.0508$  (slika 5.11). U tom smislu, putni prelazi na kojima je evidentiran veći broj poginulih, ne mora da ima proporcionalan broj povređenih i obrnuto.



**Slika 5.11.** Linearna korelacija poginulih i povređenih u saobraćajnim nesrećama i nezgodama na putno-pružnim prelazima „Infrastruktura železnice Srbije” a.d.

### 5.3. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE)

<https://www.putevi-srbije.rs/index.php/бројање-саобраћаја>

Pravilnik o prijavljivanju, istraživanju, evidentiranju, statističkom praćenju i objavljivanju podataka o nesrećama i nezgodama („Službeni glasnik RS”, broj 32/2021 od 02.04. 2021. godine);

Uredba o kategorizaciji železničkih pruga koje pripadaju javnoj železničkoj infrastrukturi „Službeni glasnik RS”, broj 92 od 29. juna 2020. godine;

Vukadinović S., J.Popović, Matematička statistika, Knjiga 2. izdanje, 2004.;

Zakon o putevima („Sl. glasnik RS”, br. 41/2018 i 95/2018 - dr. zakon);

Uredba o kategorizaciji državnih puteva („Sl. glasnik RS”, br. 105/2013, 119/2013 i 93/2015).

## 6. MODEL ZA PROCENU I KOMPARACIJU RIZIKA OD NASTANKA NESREĆA I NEZGODA NA PUTNO-PRUŽNIM PRELAZIMA

### 6.1. OSNOVE MODELA: MAKSIMALAN RIZIK, ENTROPIJA I HAOS

Haos je nauka o iznenađenjima, nelinearnim i nepredvidivim stvarima koje je nemoguće predvideti ili kontrolisati. A. Einstein je rekao: „Koliko god se zakoni matematike odnose na stvarnost, oni nisu sigurni, a koliko god su sigurni, ne odnose se na stvarnost”. Osnovni principi haosa se zasnivaju na entropiji nastaloj na tokovima termodinamike, kao novoj naučnoj misli, koja se društveno teže prihvata iz razloga manje optimističnog pristupa.

Poznatiji mikroskopski modeli drumskog saobraćajnog toka uz primenu teorije haosa su: modeli sleđenja vozila, ćelijski (celularni) automati (CA), kinetičko-teorijski, Prigožinov model, model „prati vođu”, model otimalne brzine, modeli saobraćajnog toka sa uključenim kašnjenjem itd. (Kuzmanović i dr., 2013). Saobraćaj na putno-pružnim prelazima i raskrsnicama je sklon haosu koji može nastati zbog kombinovanog efekta redovnih i slučajno nastalih događaja, kao što su promenljivost u brzini saobraćaja, zaustavljanje drumskih i železničkih vozila iz raznih razloga (defekti i sl.), nailazak pešaka, parkiranje vozila u zoni putnog prelaza, raskrsnice itd. Određena istraživanja, haotično ponašanje u toku saobraćaja, pripisuju se kašnjenju u ljudskim reakcijama (Safanov i dr., 2002).

U ovoj doktorskoj disertaciji i predloženom modelu se analizira i teorijski razmatra slučaj pojave maksimalnog broja nezgoda i nesreća u uslovima nepostojanja bilo kakve regulacije prioriteta na putno-pružnom prelazu, gde nastanak haosa, predstavlja gornju granicu rizika od pojave nesreće ili nezgode na putno-pružnom prelazu. Posmatraju se dva konfliktna toka, koja su konfliktna po 2 osnova;

- iz razloga što im se presecaju putevi vožnje;
- i zato što su saobraćajni tokovi iz 2 heterogena saobraćajna sistema.

Prioritet je izveden sa fizičkim prekidom neprioritetnog toka (rampa, polubranici) kao najviši vid zaštite, ili sa informacionim, kojim vozači neprioritetnog toka, na informaciju o predstojećoj vožnji voza samoinicijativno prekidaju neprioritetni tok (Larue, Rakotonirainy, Haworth i Darvell, 2015; Larue i dr., 2015).

Idealni bezbednosni uslovi sa nultim brojem nesreća i nezgoda, predstavljaju idealno funkcionisanje sistema sa teorijski minimalnim rizikom. Teorijski minimalan rizik predstavlja prvu inženjersku granicu.

Ako bi navedeni sistemi zaštite izostali, došlo bi do presecanja prioritetnog toka i potencijala za nesreću i nezgodu koji predstavlja stohastičku rezultantu gustine tokova. Odsustvo organizacije prioriteta uvodi sistem u haos. Potencijal za pojavu nesreće ili nezgode zavisi od gustine konfliktnih tokova.

Maksimalan broj teorijskih nezgoda ili nesreća se može realizovati u odsustvu raspodele prioriteta, tj. u teoriji haosa. Time se dobija maksimalan broj nezgoda ili nesreća koji predstavlja maksimum rizika od nastanka nezgode ili nesreće.

S obzirom da su saobraćajni tokovi stohastički raspodeljeni, proračun maksimalnog rizika se mora izvoditi probabilističkim modelima. Na ovaj način određujemo drugu inženjersku granicu. Realan rizik se nalazi u granicama između maksimalnog i minimalnog rizika.

Pojam „rizik“ se prvi put pronalazi u čuvenom Homerovom spevu Ilijade i Odiseje, IX vek stare ere. Međutim, u ovom spevu, etimologiju reči „rizik“ je potrebno razmatrati sa stanovišta mnogobrojnih sinonima reči „radikalno“ (grčki alfabet: ριζικό) kojim spev Ilijade i Odiseje obiluje, posebno u smislu ratničke beskompromisnosti. Drugi, verovatniji etimološki izvor rizika je u grčkoj reči koren (grčki alfabet: ριζκα) koji je asociirao na opasnost koja je brodovima pretila od podvodnih stena. Ovaj asocijativni izvor je verovatniji ako se uvažavaju teretrički uslovi navigacije u starom veku – plovidba uz obalu ili putanjom uz poznate hridi, rtove ili ostrva, isključivo po danu i dobroj vidljivosti. Teretrička navigacija se izvodila uz obaveznu primenu dubinometra (kanap sa čvorovima otežan kamenom). U tim uslovima plovidbe, nevidljive podvodne stene (analogno nevidljivom korenu ispod površine zemlje) uz nepoznate intenzitete plime i oseke mogle su prouzrokovati fatalna oštećenja broda. Primitivni dubinometar tako dobija titulu prvog sredstva za ocenu rizika. Noćna plovidba je bila omogućena tek sa pojavom astronomske navigacije u VI veku stare ere, za koju je zaslužan čuveni Tales iz Mileta (Ercegovac, P., at al., 2021).

Danas, rizikom se smatra efekat neizvesnosti na ciljeve (ISO31000 “Risk management – Principles and guidelines” standard, 2009.).

Sistemska haos, u smislu potpunog nereda i konfuzije, je moguće prouzrokovati u uslovima maksimalne entropije. U zavisnosti od strukture, neki sistemi mogu ostvarivati cilj i u uslovima maksimalne entropije, dok drugi sistemi ulaze u progresiju haosa i potpunu eroziju sistema.

Putno-pružni prelaz opslužuje saobraćajne tokove iz dva saobraćajna sistema i zbog toga se mora razmatrati kao heterogeni sistem. Nasuprot ideala nultog rizika, putno-pružnom prelazu se može uvesti u stanje sa maksimalnim rizikom. Ovo stanje se postiže deklaracijom identičnih prioriteta tokova uz odsustvo saobraćajne signalizacije kao nosioca informacija. Jasno je da je u praktičnim uslovima ovaj režim rada zabranjen. Međutim, u virtuelnim uslovima, ovaj režim može da kvantifikuje maksimalan rizik (Ercegovac i dr., 2021).

U praktičnim uslovima, po realizaciji nesreća ili nezgoda na putno-pružnim prelazima, sistem putno-pružnog prelaza je uveden u nestabilno stanje. Rad prelaza se obavezno obustavlja, prekidaju se saobraćajni tokovi železničkih i drumskih vozila. Posledice nesreća ili nezgoda se saniraju i sprovode procedure koje sistem putno-pružnog prelaza vraćaju u stabilno, radno stanje. U protivnom, u sistemu putno-pružnog prelaza bi došlo do haosa. U teorijskim uslovima, virtualni akcidenti ne obustavljaju saobraćajne tokove. Time se teorijski, sistem putno-pružnog prelaza uvodi u haos sa mogućnošću pojave uzastopnih virtualnih nesreća i nezgoda.

„Objektivan rizik se može dobiti iz količnika evidentiranih realnih nesreća i nezgoda  $n_{real}$  i intenziteta saobraćajnog toka železničkih i drumskih vozila. Pri tome postoji niz važnih parametara koji su sintetisani u ovom količniku. To su: prosečne vrednosti brzine i dužine vozova i drumskih vozila, nestacionarna stohastička struktura toka drumskih vozila i uobičajena deterministička struktura toka železničkih vozila, geometrijske karakteristike putno-pružnog prelaza (ugao između železničke i drumske saobraćajnice, horizontalne i vertikalne krivine), dinamika meteoroloških uslova, itd. Uslovi

odvijanja železničkog i drumskog saobraćaja i njihov uticaj se veoma teško statistički ekstrahuju iz dobijene vrednosti objektivnog rizika. Označimo objektivni, realan rizik sa  $r_{\text{real}}$ . Teorijski maksimalan rizik putno-pružnog prelaza je merljiv. On se takođe dobija iz količnika evidentiranih virtuelnih – teorijskih nesreća i nezgoda  $n_{\text{theor}}$  i intenziteta saobraćajnog toka železničkih i drumskih vozila. Time dolazimo do intervala rizika, od potpune pouzdanosti sa nulnim rizikom, do maksimalnog teorijskog rizika za zadate intenzitete saobraćajnih tokova. Označimo verovatnoću teorijskog maksimalnog - kritični rizik sa  $r_{\text{theor}}$ . Objektivni, realan rizik je uvek u intervalu teorijskih granica  $0 \leq r_{\text{real}} \leq r_{\text{theor}}$  “ (Ercegovac i dr., 2021).

Ostaje još jedno važno pitanje: kako dobiti teorijski maksimalan rizik? Odgovor na ovo pitanje se svodi na indukciju maksimalne entropije u sistemu opsluge. Na sreću, odgovor na ovo pitanje je jednostavan: primenom eksponencijalne raspodele zato što od svih kontinualnih raspodela ona ima najveću entropiju. Dakle, dovoljno je izmeriti intenzitet saobraćajnih tokova, prosečne dužine vozova i drumskih vozila, na osnovu prosečne brzine izračunati prosečnu zauzetost putno-pružnog prelaza železničkim i drumskim vozilima. Parametri prosečne zauzetosti putno-pružnog prelaza se jednostavno mogu uvrstiti u eksponencijalnu raspodelu poznate funkcije i gustine, za parametar  $\lambda > 0$ ,  $\lambda \in \mathbb{R}$  (1), poznatih parametarskih karakteristika  $M(T) = \lambda^{-1}$ ,  $D(T) = \lambda^{-2}$

$$F(t, \lambda) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}, \quad f(t, \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (6.1)$$

Kada govorimo o intuitivnom razumevanju entropije, može se reći da je entropija raspodele verovatnoće „prosečna nesigurnost“ povezana sa tom raspodelom. *Klod Shenon* je odlučio da se entropija baš tako zove, jer mu *John Von Neumannom* jednom rekao: „Iz dva razloga bi to trebalo nazvati entropijom. Na prvom mestu je Vaša funkcija nesigurnosti korišćena u statističkoj mehanici pod tim imenom, tako da već ima naziv. Na drugom mestu, što je još važnije, niko ne zna šta je zapravo entropija, tako da ćete u debati uvek imati prednost!”

Kontinuirana entropija “differential entropy“ predstavlja koncept proširenja ideje „Šenonove entropije“, kao mere prosečne prevedivosti ishoda slučajnog događaja sa kontinualnom raspodelom verovatnoća. U primeru eksponencijalne raspodele kontinuirana entropija  $h_e(t)$  je data sa (6.2):

$$h_e(t) = - \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} \ln(\lambda e^{-\lambda t}) dt = -\ln(\lambda) + 1 \quad (6.2)$$

Glavni rezultati u teoriji redova čekanja dobijaju se kada je “queueing sistem” u stanju stabilnog stanja i ako su zadovoljeni zahtevi stohastičkog procesa rođenja i smrti. Cilj ovog rada je upravo napraviti probablistički model kada je “queueing sistem” u stanju maksimalne entropije. Za primenu entropijskog pristupa, jedine potrebne informacije predstavljaju srednje vrednosti (u našem primeru srednje stope dolazaka drumskih i železničkih vozila u sistem masovnog opsluživanja, putno-pružni prelaz). Za neke sisteme opsluživanja sa jednim serverom, kada je dat očekivani broj klijenata, uslov



maksimalne entropije daje istu raspodelu verovatnoće mogućih stanja sistema kao što je postupak rođenja i smrti primenjen na M/M/1 sistem u stanju stabilnog stanja.

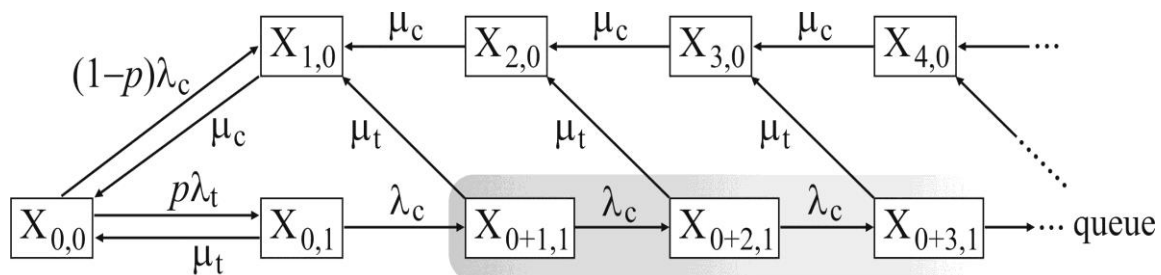
Primena eksponencijalne raspodele u sistemu putno-pružnog prelaza bez prioriteta obezbeđuje maksimalan teorijski rizik, upravo zbog najveće kontinuirane entropije. Ova činjenica je sadržana u “memoriless” osobini eksponencijalne raspodele koja je već našla primenu u oblasti testova za generisanje slučajnih brojeva (Tanackov i dr., 2019).

## 6.2. SISTEM MASOVNOG OPSLUŽIVANJA IDEALNOG PUTNOG PRELAZA

### 6.2.1. Osnova modela, graf stanja, objašnjenje stanja, proračun verovatnoća stanja

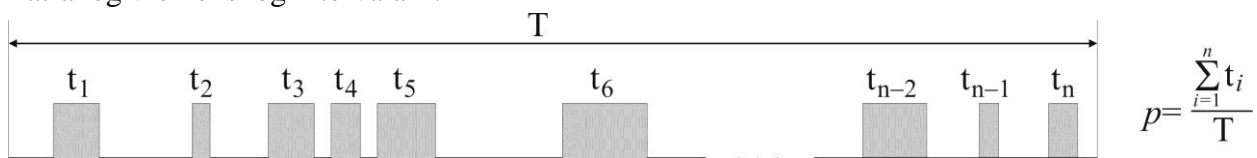
Putni prelaz se može razmatrati kao SMO koji opslužuje vozila iz dva saobraćajna sistema: železničkog i drumskog. Prema tome, SMO putnog prelaza ima heterogenu strukturu.

U idealnim bezbednosnim uslovima, bez nesreća i nezgoda, SMO putnog prelaza je prikazan na slici 6.1.



Slika 6.1. Sistem masovnog opsluživanja putno-pružnog prelaza sa безусловnim prioritetom

Polazno stanje markovskog ergodičnog sistema je  $X_{0,0}$  bez pristupa železničkih i drumskih vozila. Sistem ima definisan prioritet železničkih vozila, koji na putni prelaz pristupaju sa intenzitetom  $\lambda_t$ <sup>43</sup>, a opslužuju se sa intenzitetom  $\mu_t$ . Verovatnoća zauzetosti putnog prelaza železničkim vozilom jednaka je „p”, sa geometrijskom interpretacijom datoj na slici 6.2. Verovatnoća „p” je analogna količniku kumulanti vremena  $t_i$   $i \in [1, n]$  zauzetosti putnog prelaza prioriternim železničkim saobraćajem i posmatranog vremenskog intervala T.



Slika 6.2. Geometrijska interpretacija verovatnoća zauzetosti putno-pružnog prelaza

<sup>43</sup> Usvojena je sledeća konvencija za slovne oznake: „t” se odnosi na indeksaciju intenziteta/opsluge vozila železničkog saobraćaja, vozova, prema eng. reči „train”, a „c” se koristi kod indeksaciju intenziteta/opsluge vozila u drumskom saobraćaju, prema eng. reči „car”.

Komplementarno, pristup drumskih vozila na putni prelaz se realizuje sa verovatnoćom  $q=1-p$ , intenziteta  $\lambda_c$ . Opsluga drumskih vozila se realizuje sa intenzitetom  $\mu_c$ .

Pri zauzetosti putnog prelaza železničkim vozilom, sistem se nalazi u stanju  $X_{0,1}$ . Sva drumska vozila koja pristupaju na prelaz sa intenzitetom  $\lambda_c$ , a zbog definisanog prioriteta železničkog saobraćaja, popunjavaju stanja sistema u redu  $X_{0+1,1}, X_{0+2,1}, \dots, X_{0+k,1}$ . U idealnim uslovima, broj mesta u redu je neograničen ( $\infty$ ).

Po prolasku vozila železničkog saobraćaja, preko zone putnog prelaza, izvršena je opsluga intenzitetom  $\mu_t$ . Bez obzira na broj nakupljenih drumskih vozila, zbog *memoryless* osobine eksponencijalne raspodele, sistem prelazi iz stanja  $X_{0+k,1}$  u stanje  $X_{k,0}$ , te počinje opsluga drumskih vozila sa intenzitetom  $\mu_c$ .

U slučaju da drumsko vozilo pristupi na putni prelaz intenzitetom  $\lambda_c$ , a da stanje nije uslovljeno prioriteto železničkih vozila, sistem menja stanje iz  $X_{0,0}$  u  $X_{1,0}$ , i opslužuje sa sa intenzitetom  $\mu_c$  bez mogućnosti formiranja reda čekanja.

Prikazani sistem je bezbednosno idealizovan, jer onemogućuje istovremeni pristup vozilima dva sistema na putni prelaz, tj. ne postoji stanje  $X_{1,1}$ , koje predstavlja sudar vozila železničkog i drumskog saobraćajnog sistema.

Generalno, domen bezbednosti, rizika... se nalazi u inženjerskim granicama, od kojih je jedna uvek poznata i referentna, idealan sistem bez nesreća i nezgoda.

Druga granica do sada nije bila predmet istraživanja u modelima za procenu bezbednosti putnog prelaza. Ova granica se nalazi u apstraktnom sistemu bez ikakvih bezbednosnih propisa, odsustva prioriteta, tehničkih sistema zaštite, u kojima vozači vozila oba sistema pristupaju sistemu bez ikakve percepcije nailaska na putni prelaz, itd. Druga inženjerska granica je rezultat haosa u kojem se realizuju virtuelne nesreće i nezgode.

Prvu inženjersku granicu, bez nesreća i nezgoda, nazovimo „akcident zero”, a drugu sa maksimalnim brojem nesreća i nezgoda, nazovimo „akcident theory”. Verovatnoće ovih nesreća i nezgoda su respektivno

- $p_z$ , verovatnoća idealno bezbednog putnog prelaza koja nam je poznata  $p_z=0$ ;
- $p_{\text{theor}}$ , verovatnoća maksimalno rizičnog putnog prelaza, koja nam je nepoznata.

Stvarni broj realizovanih nesreća i nezgoda na realnim putnim prelazima „accident real” se realizuje sa verovatnoćom „ $p_{\text{real}}$ ” koja je numerički ograničena sa definisanim inženjerskim granicama,  $p_z \leq p_{\text{real}} \leq p_{\text{theor}}$ .

### 6.3. SISTEM MASOVNOG OPSLUŽIVANJA ZA PRORAČUN MAKSIMALNOG RIZIKA

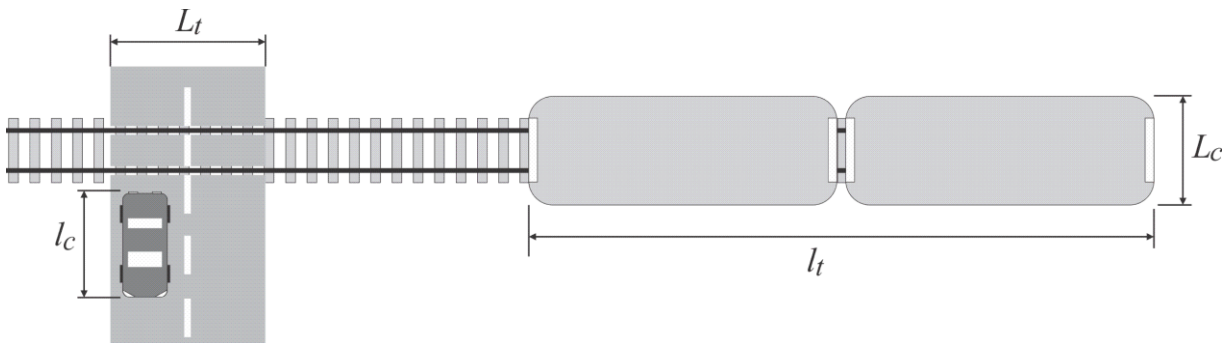
Pitanje proračuna vrednosti maksimalnog rizika se može rešiti primenom heterogenog sistema masovnog opsluživanja sa sledećim parametrima:

- $\lambda_c$ , prosečan dnevni intenzitet tokova drumskih vozila,
- $\lambda_t$ , prosečan dnevni intenzitet tokova železničkih vozila,
- $\mu_c$ , prosečan dnevni intenzitet opsluge drumskih vozila,

- $\mu_t$ , prosečan dnevni intenzitet opsluge železničkih vozila.

Ključni geometrijski parametri modela su za proračun intenziteta opsluge (slika 6.3):

- $l_c$ , srednja dužina drumskih vozila,
- $L_c$ , dužine kritičnog rastojanja za drumska vozila, koja je jednaka prosečnoj čeonj širini voza,
- $l_t$ , dužine kritičnog rastojanja, koja je jednaka prosečnoj dužini vozova,
- $L_t$ , dužine kritičnog rastojanja za železnička vozila, koja je jednaka širini putno-pružnog prelaza.



Slika 6.3. Ključni geometrijski parametri<sup>44</sup>

Intenzitet opsluge drumskih vozila proračunava se iz količnika (6.3) gde je  $v_c$  srednja brzina kretanja drumskih vozila preko kritičnog puta  $l_c + L_c$ :

$$\mu_c = \frac{l_c + L_c}{v_c} \quad (6.3)$$

Intenzitet opsluge vozova se proračunava iz količnika (6.4) gde je  $v_t$  srednja brzina kretanja železničkih vozila preko kritičnog puta  $l_t + L_t$ :

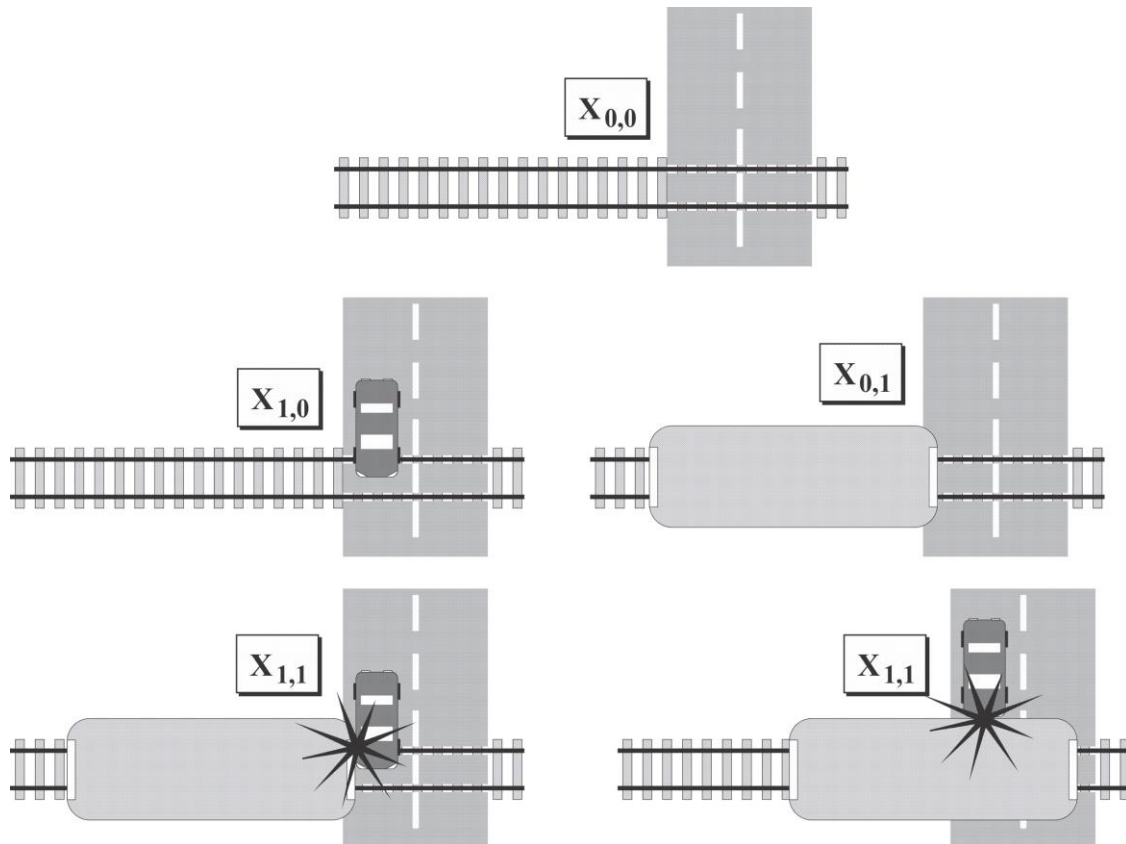
$$\mu_t = \frac{l_t + L_t}{v_t} \quad (6.4)$$

Za postizanje maksimalne entropije, tj. proračun maksimalnog rizika usvojena je eksponencijalna raspodela za dobijene parametre. Deklarisane verovatnoće stanja su sledeće (slika 6.4):

- $X_{0,0}$  putno-pružni prelaz je bez vozila,
- $X_{1,0}$  putno-pružni prelaz na kritičnom rastojanju opslužuje samo drumsko vozilo,
- $X_{0,1}$  putno-pružni prelaz na kritičnom rastojanju opslužuje samo železničko vozilo,
- $X_{1,1}$  putno-pružni prelaz istovremeno opslužuje drumsko i železničko vozilo.

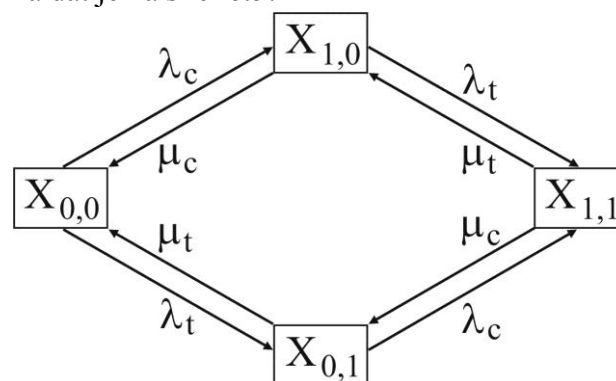
<sup>44</sup> Ercegovac, P.; Stojić, G.; Kopic, M.; Stević, Ž.; Sinani, F.; Tanackov, I. Model for Risk Calculation and Reliability Comparison of Level Crossings. *Entropy* **2021**, *23* (9), 1230; <https://doi.org/10.3390/e23091230>

Ovo stanje ima dualni status pojave nesreće/nezgode: železničko vozilo može naleteti na drumsko ili da drumsko vozilo naleti na železničko vozilo.



Slika 6.4. Moguća stanja heterogenog sistema putnog prelaza<sup>45</sup>

Graf stanja heterogenog sistema opsluživanja železničkih i drumskih vozila na putnom prelazu za proračun maksimalnog rizika dat je na slici 6.5:



Slika 6.5. Graf stanja putno-pružnog prelaza

Različita stanja sistema masovnog opsluživanja, ili različite realizacije odgovarajućih procesa u ovom modelu ilustrirali smo pomoću grafa stanja, odnosno šeme mogućih prelaza iz jednog stanja u

<sup>45</sup> Ercegovac, P.; Stojić, G.; Kopic, M.; Stević, Ž.; Sinani, F.; Tanackov, I. Model for Risk Calculation and Reliability Comparison of Level Crossings. *Entropy* **2021**, *23* (9), 1230; <https://doi.org/10.3390/e23091230>

drugo. Graf stanja na slici 6.5 prikazan je pomoću pravougaonika spojenih strelicama koji simbolizuju stanje SMO. Pravougaonici spojeni strelicama označavaju moguće neposredne prelaze sistema iz jednog stanja u drugo, a sama strelica smer prelaza.

Stanje kada se u sistemu istovremeno nađu voz i drumsko vozilo predstavlja kritično stanje, odnosno stanje kada na putno-pružnom prelazu dolazi do sudara voza i drumskog vozila. Iz datog grafa stanja može da se nađe analitičko rešenje, ukoliko je sistem masovnog opsluživanja, markovski, jednokanalni i pravilo pristupanja je po principu FIFO discipline „prvi prispeo-prvi opslužen”. Ograničićemo se na stacionaran sistem rada. Model je baziran na teorijskom razmatranju neprekidnog kretanja drumskih i železničkih vozila u sistemu opsluživanja putno-pružnog prelaza. Tok dolazaka (ulazni potok dolazaka) drumskih i železničkih vozila je Poissonov intenziteta  $\lambda_c$  i  $\lambda_t$ , obrada korisnika, odnosno posluživanje sistema putno-pružnog prelaza ima eksponencijalnu raspodelu intenziteta posluživanja  $\mu_c$  i  $\mu_t$ .

Znači, svi intenziteti opsluživanja su obavezno eksponencijalni u cilju postizanja maksimalne entropije i proračuna maksimalnog rizika. Zbog poznate osobine sabiranja intenziteta Poissonovih tokova koja je dokazana teoremom Raikova D. (1937) raspodela dvosmernih tokova drumskih vozila se bez ograničenja može raspodeliti na širinu drumske saobraćajnice  $L_t$  koja istovremeno predstavlja dužinu kritičnog rastojanja za železnička vozila.

Izvod  $p_{i,j}(t) = \frac{dp_{i,j}(t)}{dt}$  verovatnoće  $p_{i,j}(t)$  da se sistem nađe u stanju  $X_{i,j}$ , jednak je algebarskom zbiru onoliko članova koliko ima strelica na grafu stanja SMO i koje spajaju stanje  $X_{i,j}$  sa drugim stanjima uz sledeća pravila (Vukadinović, 1988):

- ako je strelica usmerena ka stanju  $X_{i,j}$ , onda se član bira sa znakom plus, a ako je strelica usmerena od stanja  $X_{i,j}$ , ka drugim stanjima, onda odgovarajući član ima ispred sebe znak minus;
- broj negativnih članova jednak je broju strelica koje polaze iz stanja  $X_{i,j}$ , a broj pozitivnih članova jednak je broju strelica koje su usmerene ka stanju  $X_{i,j}$ ;
- svaki član zbira jednak je proizvodu verovatnoće stanja iz koga strelica polazi i intenziteta potoka, odnosno opsluge, koji prevodi sistem u smeru date strelice.

Verovatnoće stanja markovskog stacionarnog sistema se proračunavaju iz početnih jednačina, gde su verovatnoće stanja respektivno date sa:

$$P(X_{0,0})=p_{0,0}, P(X_{1,0})=p_{1,0}, P(X_{0,1})=p_{0,1} \text{ i } P(X_{1,1})=p_{1,1} \quad (6.5)$$

Koristeći napred navedena pravila sastavljen je sistem diferencijalnih jednačina za verovatnoće stanja sistema prema Grafu stanja na Slici 6.5:

$$\begin{aligned} p'_{0,0}(t) &= 0 = -\lambda_c p_{0,0} - \lambda_t p_{0,0} + \mu_c p_{1,0} + \mu_t p_{0,1} \\ p'_{1,0}(t) &= 0 = -\mu_c p_{1,0} - \lambda_t p_{1,0} + \lambda_c p_{0,0} + \mu_t p_{1,1} \\ p'_{0,1}(t) &= 0 = -\mu_t p_{0,1} - \lambda_c p_{0,1} + \mu_c p_{1,1} + \lambda_t p_{0,0} \\ p'_{1,1}(t) &= 0 = -\mu_t p_{1,1} - \mu_c p_{1,1} + \lambda_t p_{1,0} + \lambda_c p_{0,1} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Ovakav sistem opsluživanja putnog prelaza, odnosno posmatrani sistem masovnog opsluživanja, podrazumeva oba stanja, naleta voza na drumsko vozilo i obrnuto.

U stacionarnom režimu rada koji podrazumeva da je:  $t \rightarrow \infty$  tj.  $p'_{i,j}(t) = 0$  ( $i, j=0,1,2,\dots, \infty$ ) za slučaj *Markov-a* sistem navedenih diferencijalnih jednačina prelazi u sistem algebarskih jednačina.

Dodaje se ovim jednačinama normirajući uslov:

$$p_{0,0} + p_{1,0} + p_{0,1} + p_{1,1} = 1 \quad (6.7)$$

U jednačinama (6.6) grupišu se konstante uz nepoznate verovatnoće stanja, respektivno  $p_{0,0}$ ,  $p_{1,0}$ ,  $p_{0,1}$  i  $p_{1,1}$  i tako sređene jednačine glase (6.8):

$$\begin{aligned} (-\lambda_c - \lambda_t)p_{0,0} + \mu_c p_{1,0} + \mu_t p_{0,1} &= 0 \\ (-\mu_c - \lambda_t)p_{1,0} + \lambda_c p_{0,0} + \mu_t p_{1,1} &= 0 \\ (-\mu_t - \lambda_c)p_{0,1} + \mu_c p_{1,1} + \lambda_t p_{0,0} &= 0 \\ (-\mu_t - \mu_c)p_{1,1} + \lambda_t p_{1,0} + \lambda_c p_{0,1} &= 0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

Prva jednačina u sistemu (6.8) množi se sa izrazom  $\left(\frac{-\lambda_c}{-\lambda_c - \lambda_t}\right)$  i nakon tog množenja novodobijena jednačina dodaje se drugoj jednačini u sistemu (6.8), a sve u cilju da se linearni sistem jednačina verovatnoća stanja, postupkom rekurzije, oslobodi jedne, od četiri nepoznate verovatnoće stanja, u ovom slučaju to je verovatnoća  $p_{0,0}$ , što je i učinjeno u (6.9).

$$\begin{aligned} (-\lambda_c - \lambda_t)p_{0,0} + \mu_c p_{1,0} + \mu_t p_{0,1} &= 0 \cdot \left(\frac{-\lambda_c}{-\lambda_c - \lambda_t}\right) \\ (-\lambda_c)p_{0,0} + \frac{\mu_c \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} p_{1,0} + \frac{\mu_t \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} p_{0,1} &= 0 \\ (-\cancel{\lambda_c})p_{0,0} + \frac{\mu_c \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} p_{1,0} + \frac{\mu_t \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} p_{0,1} - \mu_c p_{1,0} - \lambda_t p_{1,0} + \lambda_c p_{\cancel{0,0}} + \mu_t p_{1,1} &= 0 \\ \left(\frac{\mu_c \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} - \mu_c - \lambda_t\right) p_{1,0} + \frac{\mu_t \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} p_{0,1} + \mu_t p_{1,1} &= 0 \end{aligned} \quad (6.9)$$

Rešavanje linearnog sistema jednačina verovatnoća stanja nastavlja se rekurzijom, tako što se prva jednačina u sistemu (6.8) ponovo množi, ali sa izrazom  $\left(\frac{-\lambda_t}{-\lambda_c - \lambda_t}\right)$  i nakon tog množenja novodobijena jednačina dodaje trećoj jednačini u sistemu (6.8), sve u cilju da se linearni sistem jednačina verovatnoća stanja, oslobodi još jedne, od četiri nepoznate verovatnoće stanja.

$$(-\lambda_c - \lambda_t)p_{0,0} + \mu_c p_{1,0} + \mu_t p_{0,1} = 0 \cdot \left(\frac{-\lambda_t}{-\lambda_c - \lambda_t}\right)$$

$$\begin{aligned}
(-\lambda_t)p_{0,0} + \frac{\mu_c \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} p_{1,0} + \frac{\mu_t \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} p_{0,1} &= 0 \\
(-\cancel{\lambda_t})p_{0,0} + \frac{\mu_c \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} p_{1,0} + \frac{\mu_t \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} p_{0,1} + (-\mu_t - \lambda_c)p_{0,1} + \mu_c p_{1,1} + \cancel{\lambda_t} p_{0,0} &= 0 \\
\frac{\mu_c \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} p_{1,0} + \left( \frac{\mu_t \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} - \mu_t - \lambda_c \right) p_{0,1} + \mu_c p_{1,1} &= 0
\end{aligned} \tag{6.10}$$

Daljim korišćenjem sistema eliminacije nepoznatih veličina iz sistema jednačina stanja, jednačina broj (6.9) je pomnožena sa izrazom  $\left(-\frac{\mu_c}{\mu_t}\right)$  i nakon množenja i sređivanja dodata je jednačini broj (6.10). Cilj je oslobađanje od nepoznate verovatnoće stanja  $p_{1,1}$  što je i učinjeno u (6.11).

$$\begin{aligned}
\left( \frac{\mu_c \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} - \mu_c - \lambda_t \right) p_{1,0} + \frac{\mu_t \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} p_{0,1} + \mu_t p_{1,1} &= 0 \cdot \left( -\frac{\mu_c}{\mu_t} \right) \\
\left( -\frac{\mu_c}{\mu_t} \right) \left( \frac{\mu_c \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} - \mu_c - \lambda_t \right) p_{1,0} + \left( -\frac{\mu_c}{\mu_t} \right) \frac{\mu_t \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_t} p_{0,1} + \left( -\frac{\mu_c}{\cancel{\mu_t}} \right) \cancel{\mu_t} p_{1,1} &= 0 \\
\left( \frac{\mu_c \mu_c}{\mu_t} + \frac{\mu_c \lambda_t}{\mu_t} - \frac{\mu_c \mu_c \lambda_c}{\mu_t (\lambda_c + \lambda_t)} \right) p_{1,0} - \frac{\mu_c \mu_t \lambda_c}{\mu_t (\lambda_c + \lambda_t)} p_{0,1} - \mu_c p_{1,1} &= 0 \\
\left( \frac{\mu_c \mu_c}{\mu_t} + \frac{\mu_c \lambda_t}{\mu_t} - \frac{\mu_c \mu_c \lambda_c}{\mu_t (\lambda_c + \lambda_t)} \right) p_{1,0} - \frac{\mu_c \mu_t \lambda_c}{\mu_t (\lambda_c + \lambda_t)} p_{0,1} - \mu_c p_{1,1} + \overbrace{\left( \frac{\mu_c \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} p_{1,0} + \left( \frac{\mu_t \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} - \mu_t - \lambda_c \right) p_{0,1} + \mu_c p_{1,1} \right)}^{(6.10)} &= 0 \\
\left( \frac{\mu_c \mu_c}{\mu_t} + \frac{\mu_c \lambda_t}{\mu_t} - \frac{\mu_c \mu_c \lambda_c}{\mu_t (\lambda_c + \lambda_t)} + \frac{\mu_c \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} \right) p_{1,0} + \left( \frac{\mu_t \lambda_t}{\lambda_c + \lambda_t} - \mu_t - \lambda_c - \frac{\mu_c \mu_t \lambda_c}{\mu_t (\lambda_c + \lambda_t)} \right) p_{0,1} &= 0 \\
\left( \frac{\mu_c^2 (\lambda_c + \lambda_t) + \mu_c \lambda_t (\lambda_c + \lambda_t) - \mu_c^2 \lambda_c + \mu_c \mu_t \lambda_t}{\mu_t (\lambda_c + \lambda_t)} \right) p_{1,0} + \left( \frac{\mu_t^2 \lambda_t - \mu_t^2 (\lambda_c + \lambda_t) - \lambda_c \mu_t (\lambda_c + \lambda_t) - \mu_c \mu_t \lambda_c}{\mu_t (\lambda_c + \lambda_t)} \right) p_{0,1} &= 0 \\
\lambda_t \mu_c (\lambda_c + \lambda_t + \mu_c + \mu_t) p_{1,0} - \lambda_c \mu_t (\lambda_c + \lambda_t + \mu_c + \mu_t) p_{0,1} &= 0 : (\lambda_c + \lambda_t + \mu_c + \mu_t) \\
\lambda_t \mu_c p_{1,0} - \lambda_c \mu_t p_{0,1} &= 0
\end{aligned} \tag{6.11}$$

$$p_{1,0} = \frac{\lambda_c \mu_t}{\lambda_t \mu_c} p_{0,1} \tag{6.12}$$

$$p_{0,1} = \frac{\lambda_t \mu_c}{\lambda_c \mu_t} p_{1,0} \tag{6.13}$$

Iz prve i četvrte jednačine u sistemu (6.8) dobijene su vrednosti verovatnoća  $p_{0,0}$  i  $p_{1,1}$ :

$$p_{0,0} = \frac{\mu_c p_{1,0} + \mu_t p_{0,1}}{\lambda_c + \lambda_t} \tag{6.14}$$

$$p_{1,1} = \frac{\lambda_c p_{0,1} + \lambda_t p_{1,0}}{\mu_c + \mu_t} \quad (6.15)$$

Korišćenjem jednačine iz normirajućeg uslova (6.7) gde je zbir verovatnoća u stacionarnom stanju jednak jedinici, uvrštene su dobijene vrednosti (6.14) i (6.15) u jednačinu (6.7) tako da daljim računanjem i odabirom bilo koje od jednačina (6.12) ili (6.13) i zamenom nepoznatih u jednačinu (6.16) dobijena je jednačina sa jednom nepoznatom i na taj način je rešen ovaj linearni sistem sa četiri jednačine i četiri nepoznate veličine verovatnoća stanja na posmatranom putnom prelazu.

$$p_{0,0} + p_{1,0} + p_{0,1} + p_{1,1} = 1 \quad (6.7)$$

$$\frac{\mu_c p_{1,0} + \mu_t p_{0,1}}{\lambda_c + \lambda_t} + p_{1,0} + p_{0,1} + \frac{\lambda_c p_{0,1} + \lambda_t p_{1,0}}{\mu_c + \mu_t} = 1 \cdot (\lambda_c + \lambda_t)(\mu_c + \mu_t)$$

$$(\mu_c p_{1,0} + \mu_t p_{0,1})(\mu_c + \mu_t) + p_{1,0}(\lambda_c + \lambda_t)(\mu_c + \mu_t) + p_{0,1}(\lambda_c + \lambda_t)(\mu_c + \mu_t) + (\lambda_c p_{0,1} + \lambda_t p_{1,0})(\lambda_c + \lambda_t) = (\lambda_c + \lambda_t)(\mu_c + \mu_t) \quad (6.16)$$

Zamenom vrednosti  $p_{1,0}$  iz (6.12) i uvrštavanjem u (6.16), kao prva, dobijena je vrednost  $p_{0,1}$ , nakon toga  $p_{1,0}$  i dalje  $p_{0,0}$  i  $p_{1,1}$ . Znači, dobijene verovatnoće stanja sistema masovnog opsluživanja na posmatranom putnom prelazu, a u zavisnosti od intenziteta ulaznog toka drumskih putničkih vozila i vozova ( $\lambda_c, \lambda_t$ ) kao i intenziteta kojim se drumska putnička vozila i vozovi opslužuju ( $\mu_c, \mu_t$ ) iznose (6.17), odnosno od (6.17a) do (6.17d):

$$p_{1,0} = \frac{\lambda_c \mu_t}{(\mu_c + \lambda_c)(\mu_t + \lambda_t)}$$

$$p_{0,0} = \frac{\mu_c \mu_t}{(\mu_c + \lambda_c)(\mu_t + \lambda_t)} \quad p_{1,1} = \frac{\lambda_c \lambda_t}{(\mu_c + \lambda_c)(\mu_t + \lambda_t)} \quad (6.17)$$

$$p_{0,1} = \frac{\mu_c \lambda_t}{(\mu_c + \lambda_c)(\mu_t + \lambda_t)}$$

$$p_{0,0} = \frac{\mu_c \mu_t}{(\mu_c + \lambda_c)(\mu_t + \lambda_t)} \quad (6.17a)$$

$$p_{1,1} = \frac{\lambda_c \lambda_t}{(\mu_c + \lambda_c)(\mu_t + \lambda_t)} \quad (6.17b)$$

$$p_{1,0} = \frac{\lambda_c \mu_t}{(\mu_c + \lambda_c)(\mu_t + \lambda_t)} \quad (6.17c)$$

$$p_{0,1} = \frac{\mu_c \lambda_t}{(\mu_c + \lambda_c)(\mu_t + \lambda_t)} \quad (6.17d)$$



Verovatnoća stanja maksimalnog rizika jednaka je verovatnoći istovremene zauzetosti putno-pružnog prelaza sa vozilima železničkog i drumskog saobraćaja  $p_{1,1}$ . Kako su svi parametri za proračun verovatnoće stanja  $X_{1,1}$  tj. intenziteti u brojiocu pozitivni i veći od nule  $\lambda_c > 0 \wedge \lambda_t > 0$ , a proizvod u imeniocu je uvek veći od nule  $(\mu_c + \lambda_c)(\mu_t + \lambda_t) > 0$ , maksimalni rizik uvek konvergira!

Broj realizovanih nesreća i nezgoda, za potrebe komparacije možemo svesti na jedinice drumskih vozila koji je statistički evidentiran na realnom putno-pružnom prelazu  $n_{real}$  u vremenskom intervalu  $T$ , predstavlja osnovu za proračun intenziteta nesreća/nezgoda po vozilu, ili verovatnoće da će proizvoljno drumsko vozilo realizovati nesreću/nezgodu  $p_{real}$  koja je jednaka (6.18):

$$p_{real} = \frac{n_{real}}{T \cdot 365 \cdot \lambda_c} \quad (6.18)$$

gde je  $\lambda_c$ , već obrazloženi jedinični intenzitet pristupa drumskih vozila u danu, a  $T$  je vremenski period izražen u godinama za koji se analizira statistička evidencija. Realna verovatnoća nesreće ili nezgode ima dualnu mogućnost izražavanja i preko intenziteta pristupa železničkih vozila. Međutim, zbog uobičajeno većeg intenziteta drumskih vozila na putnim prelazima  $\lambda_c \gg \lambda_t$ , u daljim istraživanjima usvojen je intenzitet drumskog saobraćaja kao referentan za proračun.

Obrazac (6.18) daje verovatnoću da će proizvoljno drumsko vozilo, u realnim uslovima učestvovati u nesreći ili nezgodi.

U teorijskim uslovima, heterogeni sistem u stanju  $X_{0,0}$  sa verovatnoćom  $p_{0,0}$  opslužuje 0 drumskih vozila, i u stanju  $X_{0,1}$  (kada je putno-pružni prelazi zauzet samo železničkim vozilom) sa verovatnoćom  $p_{0,1}$  takođe opslužuje 0 drumskih vozila. To znači da je ceo tok drumskih vozila opslužen u stanjima  $X_{1,0}$  i  $X_{1,1}$  sa verovatnoćama  $p_{1,0}$  i  $p_{1,1}$  respektivno. Zbog toga je potrebno tok drumskih vozila raspodeliti na broj vozila koja su opslužena na putno-pružnom prelazu, a nisu učestvovala u nesreći ili nezgodi i broj vozila koja se zatiču u kritičnom stanju  $X_{1,1}$ , što predstavlja broj vozila koja su učestvovala u teorijskim nesrećama ili nezgodama.

Na osnovu ergodičnosti sistema raspodela je proporcionalna (6.19). Dobijena vrednost ima dimenziju nesreće/nezgode u jednom danu (zato što je intenzitet toka deklarisan po danu).

$$\lambda_c = \underbrace{\frac{p_{1,0}}{p_{1,0} + p_{1,1}} \lambda_c}_{\text{tok drumskih vozila bez nesreće ili nezgode}} + \underbrace{\frac{p_{1,1}}{p_{1,0} + p_{1,1}} \lambda_c}_{n_{theor}} \quad (6.19)$$

U uslovima kada se sistem putno-pružnog prelaza uvodi u haos sa mogućnošću pojave uzastopnih virtualnih nesreća/nezgoda i gde nam  $n_{theor}$  u vremenskom intervalu  $T$  (broj godina), predstavlja osnovu za proračun intenziteta teorijskih, virtualnih nesreća/nezgoda po vozilu, ili verovatnoće da će proizvoljno drumsko vozilo realizovati virtuelnu nesreću/nezgodu, po analognom obrascu za  $p_{real}$  (6.18), dobijena je maksimalna teorijska verovatnoća nesreće/nezgode po vozilu  $p_{theor}$  (6.20)<sup>46</sup>:

<sup>46</sup> Ercegovac, P.; Stojić, G.; Kopic, M.; Stević, Ž.; Sinani, F.; Tanackov, I. Model for Risk Calculation and Reliability Comparison of Level Crossings. *Entropy* **2021**, *23* (9), 1230; <https://doi.org/10.3390/e23091230>

$$P_{theor} = \frac{n_{theor}}{T \cdot 365 \cdot \lambda_c} \left[ \frac{\text{nesreće ili nezgode}}{\text{dan} \frac{\text{vozila}}{\text{dan}}} \right] = \frac{P_{1,1} \cdot T \cdot 365 \cdot \lambda_c}{P_{1,0} + P_{1,1}} = \frac{P_{1,1}}{(P_{1,0} + P_{1,1})} \quad (6.20)$$

Maksimalni teorijski rizik je važna referentna vrednost iz koje se dobija pouzdanost rada putno-pružnog prelaza koja uvažava sve navedene parametre, a pre svega intenzitete tokova drumskih i železničkih vozila. U statistički evidentiranim nesrećama ili nezgodama tj., posredno preko  $p_{real}$  su implicitno sadržane sve ostale karakteristike rada putno-pružnog prelaza. Sintetička pouzdanost rada putno-pružnog prelaza je data sa (6.21):

$$R = \frac{P_{theor} - P_{real}}{P_{theor}} \quad (6.21)$$

Komplementarna vrednost pouzdanosti je rizik putno-pružnog prelaza (6.22):

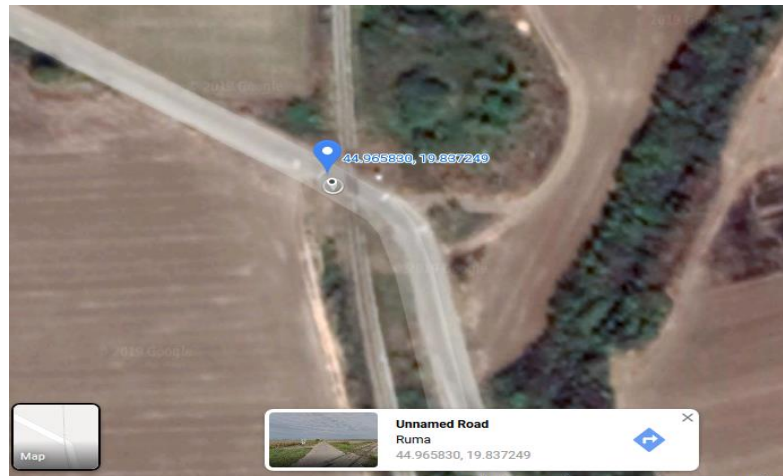
$$r = 1 - R \quad (6.22)$$

#### 6.4. TESTIRANJE MODELA NA ODABRANIM PUTNIM PRELAZIMA

Za konkretnu primenu modela odabrano je pet putno-pružnih prelaza na prugama „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. Za novopredloženi model, korišćeni su podaci o stvarnom saobraćaju vozova iz realizovanog grafikona reda vožnje za navedene putno-pružne prelaze, a podaci o PGDS-u i frekvenciji drumskog saobraćaja dobijeni su aproksimacijom podataka iz baze brojanja saobraćaja upravljača puteva na posmatranim putno-pružnim prelazima (JP „Putevi Srbije” i lokalna samouprava), dok su tehnički i geometrijski podaci za putno-pružne prelaze dobijeni merenjima na licu mesta. Deo statističkih podataka o broju nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima korišćen je iz baze Organizacione celine za saobraćajne poslove Ruma, gde je autor uključen u organizaciju i nadzor saobraćaja na posmatranom delu pruge. Takođe, jedan deo podataka je uporedno korišćen i analiziran iz projekta koji je rađen kroz studiju „Istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama pružnih prelaza” urađenu od strane Agencije za bezbednost saobraćaja RS, 2018. godine u saradnji sa profesorima Departmana za saobraćaj, FTN Novi Sad i većim brojem eksperata za ovu oblast.

##### 6.4.1. Putno-pružni prelaz Budanovci u km 3+285, pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS)

Putno-pružni prelaz „Budanovci“ se nalazi na lokalnoj saobraćajnici L-1 (Ruma-Budanovci-Nikinci-Platičevo) na stacionaži u km 3+285 regionalne pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS). Putni prelaz je pasivan i obezbeđen je saobraćajnim znacima na putu i pruži i zonom potrebne preglednosti (trougao preglednosti). Satelitski prikaz sa geografskim koordinatama putnog prelaza dat je na slici 6.6.



Slika 6.6 . Satelitski snimak putnog prelaza „Buđanovci“

Svi evidentirani stacionarni i dinamički parametri putno-pružnog prelaza su dati u tabeli 6.1. Srednja dužina drumskih vozila je dobijena na osnovu strukture toka (automobili, kamioni, autobusi, poljoprivredna vozila sa priključnim vozilima). Takođe, za ovaj putno-pružni prelaz, izračunati su parametri modela sistema masovnog opsluživanja za proračun maksimalnog rizika prikazanog u tački 6.3. ove doktorske disertacije. Broj evidentiranih nesreća/nezgoda u periodu od 2007. do 2017. godine na ovom putnom prelazu je 6.

Tabela 6.1. Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Buđanovci“

Srednja brzina vozova preko putno-pružnog prelaza (km/h)	70
Srednja brzina drumskih vozila preko putno-pružnog prelaza (km/h)	32
$\lambda_t$ (vozova/dan)	23
$\lambda_c$ (drumskih vozila/dan)	807
$l_t$ (prosečna dužina vozova u m)	350
$L_t$ (dužina žel. vozila preko kritičnog puta u m)	5,00
$l_c$ (prosečna dužina drumskog vozila u m)	6,80
$L_c$ (dužina drumskog vozila preko kritičnog puta u m)	2,80
Intenzitet opsluge vozova $\mu_t=(l_t+L_t)/v_t$	4732,394
Intenzitet opsluge drumskih vozila $\mu_c=(l_c+L_c)/v_c$	80000,000
Verovatnoća realnog akcidenta $p_{real}$	0,000001851792
Verovatnoća teorijskog akcidenta $p_{theor}$	0,004836612535
Sintetička pouzdanost putno-pružnog prelaza ( $R$ )	0,99961713041
Rizik ( $r$ )	0,00038286959

#### 6.4.2. Putno-pružni prelaz Platičevo u km 21+465, pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS)

Putno-pružni prelaz „Platičevo“ se nalazi na državnom putu IB reda br. 21 (Novi Sad-Irig-Ruma-Šabac) i na stacionaži u km 21+465 regionalne pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS). Putni prelaz je aktivan i obezbeđen je polubranicama, svetlosnim i zvučnim signalima. Putnim prelazom se rukuje preko stanične postavnice i to isključivo od strane otpravnika vozova prilikom obezbeđenja puta vožnje. Satelitski prikaz sa geografskim koordinatama putnog prelaza dat je na slici 6.7.



Slika 6.7. Satelitski snimak putnog prelaza „Platičevo“

Svi evidentirani stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza su dati u tabeli 6.2. Srednja dužina drumskih vozila je dobijena na osnovu strukture toka (automobili, kamioni, autobusi, poljoprivredna vozila sa priključnim vozilima). Takođe, za ovaj putno-pružni prelaz, izračunati su parametri modela sistema masovnog opsluživanja za proračun maksimalnog rizika prikazanog u tački 6.3. ove doktorske disertacije. Broj evidentiranih nesreća/nezgoda u periodu od 2007. do 2017. godine na ovom putnom prelazu je 2.

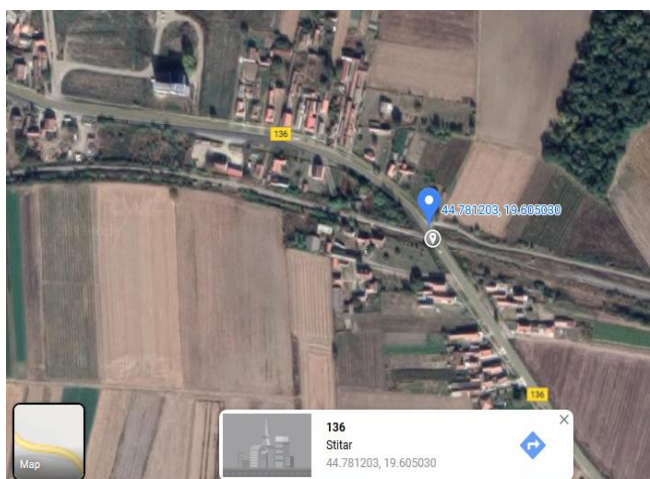
Tabela 6.2. Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Platičevo“

Srednja brzina vozova preko putno-pružnog prelaza (km/h)	34
Srednja brzina drumskih vozila preko putno-pružnog prelaza (km/h)	70
$\lambda_t$ (vozova/dan)	23
$\lambda_c$ (drumskih vozila/dan)	7628
$l_t$ (prosečna dužina vozova u m)	350
$L_t$ (dužina žel. vozila preko kritičnog puta u m)	8,50
$l_c$ (prosečna dužina drumskog vozila u m)	5,20
$L_c$ (dužina drumskog vozila preko kritičnog puta u m)	2,80

Intenzitet opsluge vozova $\mu_t=(l_t+L_t)/v_t$	4686,192
Intenzitet opsluge drumskih vozila $\mu_c=(l_c+L_c)/v_c$	102000,000
Verovatnoća realnog akcidenta $p_{\text{real}}$	0,000000065303
Verovatnoća teorijskog akcidenta $p_{\text{theor}}$	0,004884064551
Sintetička pouzdanost putno-pružnog prelaza ( $R$ )	0,99998662935
Rizik ( $r$ )	0,00001337065

#### 6.4.3. Putno-pružni prelaz Štitar u km 8+151, pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS)

Putno-pružni prelaz „Štitar“ se nalazi na državnom putu IIA reda br. 136 (Majur-Bogatić-Petlovača) i na stacionaži u km 8+151 regionalne pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS). Putni prelaz je aktivan i obezbeđen je branicima i saobraćajnim znacima na putu. Putnim prelazom, koji je mehanički i sa žicovodom, rukuje otpravnik vozova prilikom obezbeđenja puta vožnje. Satelitski prikaz sa geografskim koordinatama putnog prelaza dat je na slici 6.8.



Slika 6.8. Satelitski snimak putnog prelaza „Štitar“

Svi evidentirani stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza su dati u tabeli 6.3. Srednja dužina drumskih vozila je dobijena na osnovu strukture toka (automobili, kamioni, autobusi, poljoprivredna vozila sa priključnim vozilima). Takođe, za ovaj putno-pružni prelaz, izračunati su parametri modela sistema masovnog opsluživanja za proračun maksimalnog rizika prikazanog u tački 6.3. ove doktorske disertacije.

Broj evidentiranih nesreća/nezgoda u periodu od 2007. do 2017. godine na ovom putnom prelazu je 1.

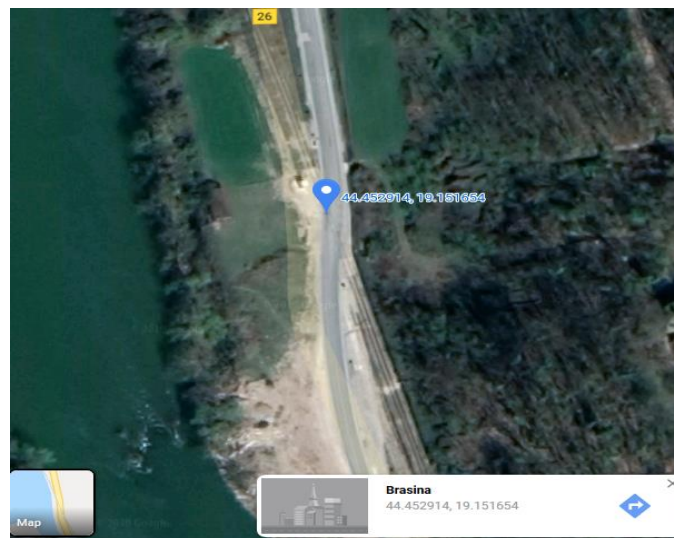
Tabela 6.3. Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Štitar“

Srednja brzina vozova preko putno-pružnog prelaza (km/h)	25
Srednja brzina drumskih vozila preko putno-pružnog prelaza (km/h)	70
$\lambda_t$ (vozova/dan)	7

$\lambda_c$ (drumskih vozila/dan)	2910
$l_t$ (prosečna dužina vozova u m)	350
$L_t$ (dužina žel. vozila preko kritičnog puta u m)	10,50
$l_c$ (prosečna dužina drumskog vozila u m)	5,20
$L_c$ (dužina drumskog vozila preko kritičnog puta u m)	2,80
Intenzitet opsluge vozova $\mu_t=(l_t+L_t)/v_t$	4660,194
Intenzitet opsluge drumskih vozila $\mu_c=(l_c+L_c)/v_c$	75000,000
Verovatnoća realnog akcidenta $p_{real}$	0,000000085590
Verovatnoća teorijskog akcidenta $p_{theor}$	0,001499830463
Sintetička pouzdanost putno-pružnog prelaza ( $R$ )	0,99994293376
Rizik ( $r$ )	0,00005706624

#### 6.4.4. Putno-pružni prelaz Brasina u km 66+207, pruge pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, ŽRS)

Putno-pružni prelaz „Brasina“ se nalazi na državnom putu IB reda br. 26, Beograd-Obrenovac-Šabac-Loznica-državna granica sa Bosnom i Hercegovinom (granični prelaz Mali Zvornik) i na stacionaži u km 66+207 regionalne pruge Ruma–Šabac–Rasputnica Donja Borina–Državna granica–(Zvornik Novi, Željeznice Republike Srpske-ŽRS). Putni prelaz je pasivan i obezbeđen je saobraćajnim znacima na putu i pruži i zonom potrebne preglednosti (trougao preglednosti)<sup>47</sup>. Satelitski prikaz sa geografskim koordinatama putnog prelaza dat je na slici 6.9.



Slika 6.9. Satelitski snimak putnog prelaza „Brasina“

<sup>47</sup> U periodu vršenja analize od 2007. do 2017. godine putno-pružni prelaz je imao navedeno obezbeđenje. Od 15.01.2019. godine (period koji nije analiziran) putno-pružni prelaz je obezbeđen elektronskim uređajem sa polubranicama, svetlosnim i zvučnim signalima. Uključenje uređaja vrši otpravnik vozova prilikom obezbeđenja puta vožnje preko komandnog pulta, a isključenje se vrši automatski od strane šinskog vozila preko isključnih uređaja.

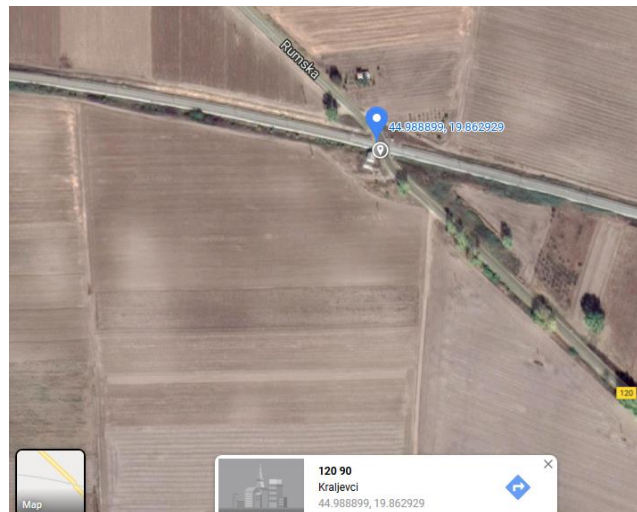
Svi evidentirani stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza su dati u tabeli 6.4. Srednja dužina drumskih vozila je dobijena na osnovu strukture toka (automobili, kamioni, autobusi, poljoprivredna vozila sa priključnim vozilima). Takođe, za ovaj putno-pružni prelaz, izračunati su parametri modela sistema masovnog opsluživanja za proračun maksimalnog rizika prikazanog u tački 6.3. ove doktorske disertacije. Broj evidentiranih nesreća/nezgoda u periodu od 2007. do 2017. godine na ovom putnom prelazu je 3.

Tabela 6.4. Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Brasina“

Srednja brzina vozova preko putno-pružnog prelaza (km/h)	28
Srednja brzina drumskih vozila preko putno-pružnog prelaza (km/h)	70
$\lambda_t$ (vozova/dan)	7
$\lambda_c$ (drumskih vozila/dan)	3135
$l_t$ (prosečna dužina vozova u m)	350
$L_t$ (dužina žel. vozila preko kritičnog puta u m)	6,00
$l_c$ (prosečna dužina drumskog vozila u m)	5,20
$L_c$ (dužina drumskog vozila preko kritičnog puta u m)	2,80
Intenzitet opsluge vozova $\mu_t=(l_t+L_t)/v_t$	4719,101
Intenzitet opsluge drumskih vozila $\mu_c=(l_c+L_c)/v_c$	72258,065
Verovatnoća realnog akcidenta $p_{real}$	0,000000238341
Verovatnoća teorijskog akcidenta $p_{theor}$	0,001481136314
Sintetička pouzdanost putno-pružnog prelaza ( $R$ )	0,99983908255
Rizik ( $r$ )	0,00016091745

#### 6.4.5. Putno-pružni prelaz Kraljevci u km 62+008, magistralne pruge Beograd Centar-Stara Pazova-Šid- drž.granica (Tovarnik, HŽ)

Putno-pružni prelaz „Kraljevci“ se nalazi na državnom putu IIA reda br. 120–državna granica sa Hrvatskom (granični prelaz Šid)–Šid–Kuzmin–Sremska Mitrovica–Ruma–Pećinci–Obrenovac i na stacionaži u km 62+008 magistralne pruge Beograd Centar-Stara Pazova-Šid- drž.granica (Tovarnik, Hrvatske Železnice-HŽ). Putni prelaz je aktivan i obezbeđen je automatskim polubranicima sa svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu. Satelitski prikaz sa geografskim koordinatama putnog prelaza dat je na slici 6.10.



Slika 6.10. Satelitski snimak putnog prelaza „Kraljevci“

Svi evidentirani stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza su dati u tabeli 6.5. Srednja dužina drumskih vozila je dobijena na osnovu strukture toka (automobili, kamioni, autobusi, poljoprivredna vozila sa priključnim vozilima). Takođe, za ovaj putno-pružni prelaz, izračunati su parametri modela sistema masovnog opsluživanja za proračun maksimalnog rizika prikazanog u tački 6.3. ove doktorske disertacije. Broj evidentiranih nesreća/nezgoda u periodu od 2007. do 2017. godine na ovom putnom prelazu je 6.

Tabela 6.5. Stacionarni i dinamički parametri putnog prelaza „Kraljevci“

Srednja brzina vozova preko putno-pružnog prelaza (km/h)	35
Srednja brzina drumskih vozila preko putno-pružnog prelaza (km/h)	100
$\lambda_t$ (vozova/dan)	28
$\lambda_c$ (drumskih vozila/dan)	3063
$l_t$ (prosečna dužina vozova u m)	450
$L_t$ (dužina žel. vozila preko kritičnog puta u m)	9,00
$l_c$ (prosečna dužina drumskog vozila u m)	5,50
$L_c$ (dužina drumskog vozila preko kritičnog puta u m)	3,00
Intenzitet opsluge vozova $\mu_t=(l_t+L_t)/v_t$	5228,758
Intenzitet opsluge drumskih vozila $\mu_c=(l_c+L_c)/v_c$	98823,529
Verovatnoća realnog akcidenta $p_{real}$	0,000000487886
Verovatnoća teorijskog akcidenta $p_{theor}$	0,005326476717
Sintetička pouzdanost putno-pružnog prelaza ( $R$ )	0,99990840354
Rizik ( $r$ )	0,00009159646



## 6.5. DISKUSIJA

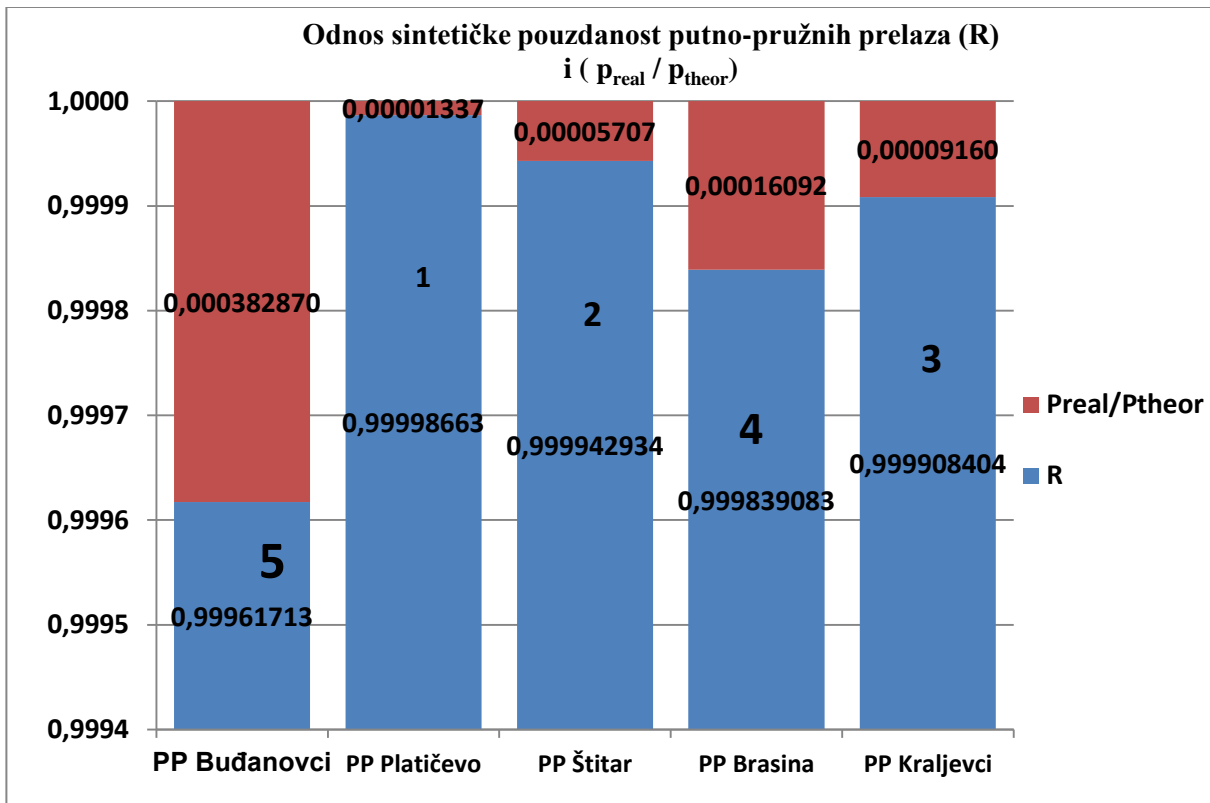
Kao što se moglo videti, potvrđena je funkcionalnost predloženog modela i došlo se do pokazatelja nivoa sintetičke pouzdanosti i rizika za svaki posmatrani putno-pružni prelaz pojedinačno. Nakon izvršene komparacije u datom odabiru, najmanji nivo sintetičke pouzdanosti prema tabeli 6.6. i grafiku br. 6.1. i najveći rizik od pojave nesreća/nezgoda prema tabeli 6.7. i grafiku br. 6.2. izračunat je za putno-pružni prelaz „Buđanovci”, potom „Brasina”, „Kraljevci” i „Štitar”, a najviši nivo sintetičke pouzdanosti i najmanji rizik od pojave nesreća/nezgoda, prema predloženom modelu u grupi posmatranih putno-pružnih prelaza, izračunat je za putno-pružni prelaz u stanici „Platičevo”. Putno-pružni prelaz u „Buđanovcima”, ima najniži nivo obezbeđenja (nivo 1) i najnepovoljnije terenske uslove, što će se detaljnije razmotriti u daljem izlaganju i zaključku i ovaj prelaz biće bliže opisan i diskutovan u tač. 6.5.1.

**Hipoteza** ove doktorske disertacije i sprovedenog istraživanja, postavljena u delu 1.4. ovog rada koja glasi: „U definisanom inženjerskom okviru, od determinističke do stohastičke granice događaja se nalazi proporcija za estimaciju (procenu) i komparaciju rizika od nastanka nezgoda i nesreća na putno-pružnim prelazima. Proračun ove proporcije je zasnovan na realnim događajima i biće moguće utvrđivanje nivoa rizika za svaki putno-pružni prelaz pojedinačno **je potvrđena.**”

Pored toga što se za svaki putno-pružni prelaz može pojedinačno izračunati nivo sintetičke pouzdanosti i bezbednosti i rizik od pojave nesreća/nezgoda, korišćenjem predloženog modela pokazano je da se može vršiti poređenje za bilo koju odabranu posmatranu grupu putno-pružnih prelaza i na osnovu dobijenih rezultata izvršiti rangiranje u cilju predloga za poboljšanje nivoa obezbeđenja putno-pružnih prelaza i smanjenja rizika od pojave nesreća i nezgoda.

**Tabela 6.6.** Pregled nivoa pouzdanosti za posmatrane putno-pružne prelaze

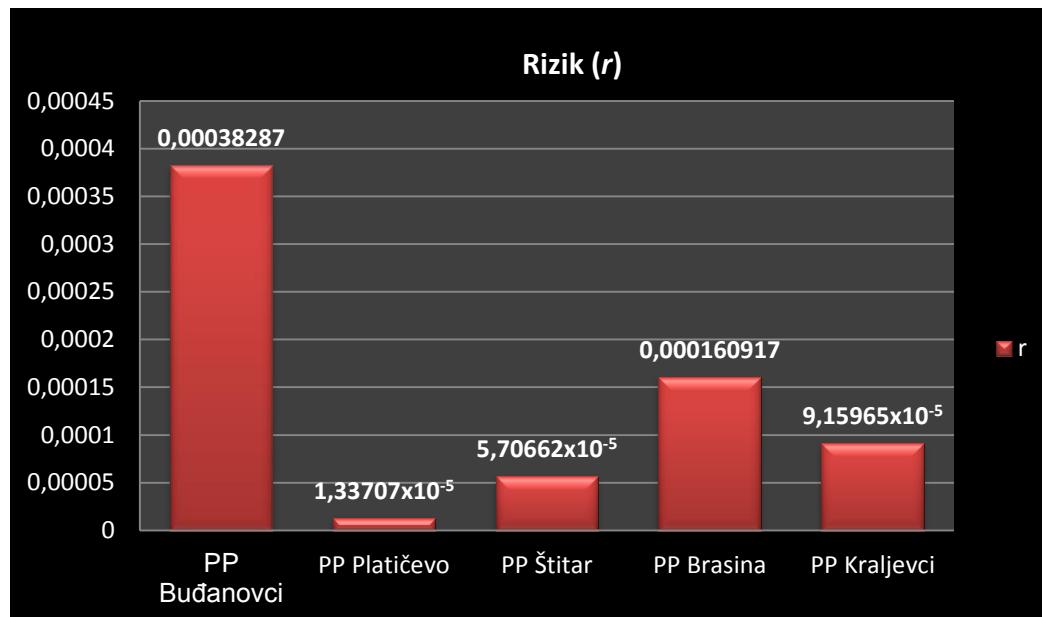
	PP Buđanovci	PP Platičevo	PP Štitar	PP Brasina	PP Kraljevci
R	0,999617130	0,999986629	0,999942934	0,999839083	0,999908404
$p_{\text{real}}/p_{\text{theor}}$	0,000382870	0,000013371	0,000057066	0,000160917	0,000091596



**Grafik 6.1.** Komparacija nivoa bezbednosti, odnosno sintetičke pouzdanosti (R) za pet putno-pružnih prelaza

**Tabela 6.7.** Pregled vrednosti rizika (r) za posmatrane putno-pružne prelaze

	PP Buđanovci	PP Platičevo	PP Štitar	PP Brasina	PP Kraljevci
<b>r</b>	0,00038287	$1,33707 \times 10^{-5}$	$5,70662 \times 10^{-5}$	0,000160917	$9,15965 \times 10^{-5}$



**Grafik 6.2.** Pregled vrednosti rizika (r) za posmatrane putno-pružne prelaze

Na osnovu dobijenih sintetičkih parametara koji uvažavaju sve statičke i dinamičke atribute opserviranih putnih prelaza, izvršena je komparacija analiziranih prelaza u datoj grupi između najmanje i najviše pouzdanog putno-pružnog prelaza, odnosno, došlo se do važnog objektivnog odgovora koji se do sada nalazio u subjektivnoj zoni: koliko je putni prelaz „Buđanovci“, rizičniji od putnog prelaza „Platičevo“? Količnik njihovih rizika je:

$$\Delta_1 = \frac{r_{\text{Budjanovci}}}{r_{\text{Platicevo}}} = \frac{0,00038286959}{0,00001337065} = 28,63509 \quad (6.23)$$

Kao prvi komparativni rezultat, dobijena vrednost 28,63509<sup>48</sup> veća bezbednost na putnom prelazu „Platičevo“ od bezbednosti na putnom prelazu „Buđanovci“, je donekle očekivajući. Ovde treba imati u vidu različite nivoe obezbeđenja i različite stacionarne i dinamičke parametre kao i daleko veći tok drumskih vozila na putnom prelazu „Platičevo“.

Putni prelaz „Platičevo“ je aktivan putni prelaz, ima viši nivo obezbeđenja u odnosu na putni prelaz „Buđanovci“ i manji broj realnih nesreća/nezgoda realizovanih u posmatranom vremenskom periodu. Bez obzira na daleko veći tok drumskih vozila na putnom prelazu „Platičevo“, prema verovatnoći pojave realne nesreće/nezgode  $p_{\text{real}}$  svako 15.313.210 vozilo će učestvovati u

<sup>48</sup> Ercegovac, P.; Stojić, G.; Kopic, M.; Stević, Ž.; Sinani, F.; Tanackov, I. Model for Risk Calculation and Reliability Comparison of Level Crossings. *Entropy* **2021**, *23*(9), 1230; <https://doi.org/10.3390/e23091230>

nesreći/nezgodi, dok će na prelazu „Buđanovci” svako 540.017,5 vozilo učestvovati u nesreći/nezgodi, što ide u prilog dobijenim rezultatima testiranja modela.

Putni prelaz „Platičevo“ je aktivan putni prelaz, na kojem su korisnici prelaza zaštićeni ili se upozoravaju na približavanje voza aktiviranjem uređaja, u slučaju, kada za korisnika nije bezbedno da prelazi preko prelaza. U pitanju je slučaj ručnog upravljanja, uređaj putnog prelaza aktivira ovlašćeno lice upravljača železničke infrastrukture, kada primi informaciju putem sredstava dokaznog sporazumevanja, u sklopu bezbednog organizovanja saobraćaja. Na putnom prelazu „Platičevo“, postojanje barijere koja se spušta, kada se voz približava putnom prelazu, kako bi se sprečio prelaz drumskih vozila ili pešaka, bitno utiče na nivo bezbednosti i pouzdanosti ovog prelaza i prikazan model je na validan način, kroz proračun sintetičke pouzdanosti i poređenja maksimalnog rizika za oba prelaza eksplicitno iskazao koji prelaz je bezbedniji i koliko puta. Vršena je komparacija i prikazano je koliko je puta putno-pružni prelaz u Platičevu pouzdaniji i bezbedniji u odnosu na ostale putno-pružne prelaze u analiziranoj grupi i rezultati su dati u izrazima od (6.24) do (6.26):

$$\Delta_2 = \frac{r_{Brasina}}{r_{Platicevo}} = \frac{0,00016091745}{0,00001337065} = 12,0351 \quad (6.24)$$

$$\Delta_3 = \frac{r_{Kraljevci}}{r_{Platicevo}} = \frac{0,00009159646}{0,00001337065} = 6,85056 \quad (6.25)$$

$$\Delta_4 = \frac{r_{Štitar}}{r_{Platicevo}} = \frac{0,00005706624}{0,00001337065} = 4,26802 \quad (6.26)$$

### 6.5.1. Predlog poboljšanja nivoa bezbednosti na putno-pružnom prelazu „Buđanovci” sa detaljnim opisom tehničko-tehnoloških karakteristika mesta ukrštaja i ovog dela pruge

Prema Uredbi o kategorizaciji železničkih pruga koje pripadaju javnoj železničkoj infrastrukturi „Službeni glasnik RS”, broj 50 od 12. jula 2019. godine, pruga Ruma – Šabac – Rasputnica Donja Borina – Državna granica – (Zvornik Novi, ŽRS), pripada kategoriji regionalnih pruga i broj pruge je 211. Kategorija dela pruge, između stanica Ruma i Šabac, prema objavi UIC 700 je D3, sa osovinskom masom od 22,5 t i masom po dužnom metru od 7,2 t/m'. Pruga je jednokolosečna i nije elektrificirana. Dužina zaustavnog puta na celoj pruži iznosi 700 m. Minimalan radijus krivine je  $R=300$  m.

Najveća dopuštena dužina voza, obzirom na korisnu dužinu staničnih koloseka, na pripadajućem rasporednom odseku Ruma–Šabac, iznosi 518 metara. Organizacija i regulisanje saobraćaja na ovom delu pruge vrši se mešavinom uprošćenog relejnog i klasičnim osiguranjem uz otpremanje vozova u staničnom razmaku. Stanica Buđanovci nije posednuta, a za putno-pružni prelaz „Buđanovci” se smatra da se nalazi na otvorenoj pruži između dve posednute stanice Ruma i Platičevo, što predstavlja jedno međustanično rastojanje, u navedenom slučaju.

Drumska saobraćajnica iz smera Rume ima „s” krivinu i rastojanje između dve krivine (početne i same horizontalne krivine u području putnog prelaza iznosi oko 450 metara). U području putno-pružnog prelaza postoje dva nekategorisana poljoprivredna puta koja potencijalno ugrožavaju bezbednost saobraćaja na ovom prelazu i ne postoji nikakvo ograničenje brzine, kao ni prateća signalizacija, uzimajući u obzir nepreglednost na ovom mestu ukrštaja koji je pored prisutnosti horizontalne, ima i vertikalnu krivinu.

Naziv drumske saobraćajnice koja se ukršta sa prugom na ovom mestu je Ruma-Buđanovci-Nikinci-Platičevo. Put je opštinski, oznake L-1 i ima asfaltnu podlogu. Širina puta na mestu ukrštanja je 5 metara. Ugao ukrštanja pruge i puta je  $\alpha=53^\circ$ . Patos putnog prelaza je uređen drvenim pragovima koji su delimično oštećeni, šine su tipa S-49, a dužina leve i desne kontrašine iznosi oko 7 metara. Najveća dopuštena brzina na ovom delu pruge prema Materijalu reda vožnje za 2020/2021. godinu iznosi 80 km/h za putničke i 70 km/h za teretne vozove, dok na drumskoj saobraćajnici, shodno članu 44 Zakona o bezbednosti saobraćaja na putevima („Sl. glasnik RS”, br. 41/2009, 53/2010, 101/2011, 32/2013 - odluka US, 55/2014, 96/2015 - dr. zakon, 9/2016 - odluka US, 24/2018, 41/2018, 41/2018 - dr. zakon, 87/2018 i 23/2019) maksimalna brzina iznosi  $V_{max} = 80$  km/h.

U području putnog prelaza ne postoji ulična rasveta, ne postoje pešačke, kao ni biciklističke staze, što se može videti u fotodokumentaciji. Vertikalna drumska signalizacija postoji u potpunosti.

Signalne železničke oznake 209: „Pazi, putni prelaz” postoje sa obe strane pruge (iz smera stanica Ruma i Buđanovci) i ugrađene su propisno na 500 m od putnog prelaza.

Vertikalna drumska signalizacija je potpuna i novopostavljena, dok je horizontalna izbledela i slabo označena. Iz smera Ruma postoje oba trougla preglednosti, dok iz smera Buđanovaca trougao preglednosti ne postoji i nemoguće je uočiti kretanje železničkih vozila iz pravca Rume, sve do momenta dolaska u samo područje putno-pružnog prelaza (egzistira veliko rastinje i deblje šiblje i granje sa desne strane posmatrano u smeru kretanja), a sa leve strane pruga ide paralelno sa drumskom saobraćajnicom i u nastavku prema Buđanovcima je u krivini, što dodatno otežava uočavanje voza iz smera Buđanovaca (Šapca) jer je i prilaz putnom prelazu u horizontalnoj (i vertikalnoj) krivini. Subjekt nadležan za održavanje drumske saobraćajnice je: JKP „Parking i infrastruktura Ruma”, 27. oktobra 38/2, 22400 Ruma. Pregled nesreća i nezgoda koje su se desile na putnom prelazu u periodu od 01.01.1996. godine do 31.12.2020. godine dat je u tabeli broj 6.8.

**Tabela 6.8.** Detaljan opis nesreća i nezgoda od 1996. do 2020. god. na putno-pružnom prelazu u km 3+285 pruge Ruma-Šabac- Rasputnica Donja Borina-drž.gr.-(Zvornik Novi)

R. br.	Datum i vreme	Opis	Povredeni		Usmrćeni	Mater. šteta (dinar)	Odgovornost
			Lakše	Teže			
1.	04.09.1996. u 13.05	Nalet voza na motorno vozilo	0	0	1	/	Treće lice, vozač motornog vozila
2.	02.03.1998. u 06.55	Nalet voza na motorno vozilo	1	0	0	/	Treće lice, vozač motornog vozila
3.	18.01.2006. u 15.32	Nalet voza na motorno vozilo	0	0	0	/	Treće lice, vozač motornog vozila; V. N.
4.	17.10.2006.	Nalet voza na traktor	0	2	0	171.590,93	Treće lice, vozač

	u 12.35	sa dve prikolice					traktora; K.M.
5.	22.12.2007. u 07.07	Nalet voza na motorno vozilo	0	1	1	4.800,00	Treće lice, vozač motornog vozila; A.J.
6.	05.02.2008. u 16.45	Nalet voza na traktor	0	0	0	/	Treće lice, vozač traktora; G.J.
7.	07.05.2009. u 16.45	Nalet voza na motorno vozilo	0	0	0	/	Treće lice, vozač mot. vozila; S. R.
8.	23.08.2009. u 17.33	Nalet voza na motorno vozilo	0	0	0	/	Treće lice, vozač motornog vozila; P. Ž.
9.	03.07.2012. u 17.18	Nalet voza na motorno vozilo( kombi)	0	0	0	/	Treće lice, vozač motornog vozila ; S. Ž.
10.	23.06.2016. u 13.57	Nalet DMG 711-041 na motorno vozilo	0	1	0	63.300,00	Treće lice, vozač motornog vozila; K. J.
11.	31.03.2017. u 22.22	Nalet voza na motorno vozilo	0	0	0		Treće lice, vozač motornog vozila
12.	29.08.2017. u 06.44	Nalet voza na motorno vozilo	0	0	0	123.000,00	Treće lice, vozač motornog vozila





U tabeli 6.9. dat je pregled lakše i teže povređenih lica i lica koja su izgubila život u realizovanih 12 nesreća i nezgoda na ovom putno-pružnom prelazu u periodu od 24 godine.





**Tabela 6.9.** Pregled broja povređenih i usmrćenih lica PP „Buđanovci” od 1996. do 2020. godine

Broj nesreća i nezgoda u periodu od 23 godine (1996-2020)	<b>12</b>
Broj lica koja su izgubila život na putnom prelazu (1996-2020)	<b>2</b>
Broj lica koja su teže povređena na putnom prelazu (1996-2020)	<b>4</b>
Broj lica koja su lakše povređena na putnom prelazu (1996-2020)	<b>1</b>



**Tabela 6.10.** Detaljna foto-dokumentacija putno-pružnog prelaza „Buđanovci”

<b>FOTO - DOKUMENTACIJA</b>	
<p>Na udaljenosti 240 m od putnog prelaza sa obe strane postavljeni su signalni znaci (I-33) na stubove od znaka „približavanje mestu ukrštanja puta i železničke pruge” (I-35)</p>	

<p><b>Prilaz iz smera Ruma - 160 metara</b></p>	
<p><b>Prilaz iz smera Ruma-80 metara</b></p>	
<p><b>Prilaz području putnog prelaza iz smera Rume (vidi se nekategorisan poljoprivredni put u blizini područja putnog prelaza)</b></p>	
<p><b>Patos putnog prelaza (drveni pragovi)</b></p>	
<p><b>Područje putnog</b></p>	

<p>prelaza, smer Ruma-Budanovci</p>			
<p>Pogled sa putnog prelaza na prugu prema Budanovcima (Šapcu) prilikom kretanja drumskom saobraćajnicom iz Rume</p>			
<p>Pogled sa putnog prelaza na prugu prema Rumi prilikom kretanja drumskom saobraćajnicom iz Rume</p>			
<p>Prilaz području putnog prelaza iz smera Budanovaca (vidi se nekategorisan poljoprivredni put u blizini područja putnog prelaza) i nije obezbeden trougao preglednosti. Horizontalna signalizacija izbledela.</p>			



<p><b>Prilaz području putnog prelaza iz smera Buđanovaca (nekategorisan poljoprivredni put u neposrednoj blizini područja putnog prelaza) i rastinje ometa obezbeđenje trougla preglednosti</b></p>			
<p><b>Pogled na putni prelaz sa pruge iz smera Ruma</b></p>			
<p><b>Pogled na putni prelaz sa pruge iz smera Buđanovci (Šabac)</b></p>			

Putno-pružni prelaz „Buđanovci” posmatramo kao pasivni prelaz, gde učesnici u drumskom saobraćaju imaju glavnu ulogu i potpunu odgovornost da pazе na železnički saobraćaj i donose odluku kada je bezbedno преći putno-pružni prelaz, a da često nemaju informacije kojom brzinom se kreću železnička vozila. Sigurnost i bezbednost na ovom putno-pružnom prelazu, kao i većini pasivnih putno-pružnih prelaza, se oslanja na korisnike puta, ali zbog kognitivnih sposobnosti učesnika u drumskom saobraćaju, dolazi i do grešaka koje su najčešće uzrok pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima.

Na ovom prelazu je manja frekvencija drumskog saobraćaja. Ovaj putno-pružni prelaz se nalazi u ruralnom području i koristi se uglavnom za potrebe lokalnog stanovništva i od strane poljoprivrednih proizvođača koji voze sa jedne oblasti na drugu oblast. Manji broj vozova na dan je možda doveo do toga da su učesnici u drumskom saobraćaju postepeno razvili opasne navike prilikom prelaska pruge i uz smanjen nivo opreza, ne prihvataju adekvatno verovatnoću približavanja voza. Model baziran na teoriji

masovnog opsluživanja uz određivanje rizika u uslovima maksimalne entropije i haosa je validan i odredio je najmanji nivo sintetičke pouzdanosti i najveći rizik od pojave nesreća/nezgoda, upravo na ovom putno-pružnom prelazu, u odnosu na ostale posmatrane prelaze u grupi i napred navedeni razlozi su u direktoj vezi sa dobijenim rezultatima validacije predloženog modela.

Pravilnikom o načinu ukrštanja železničke pruge i puta, pešačke ili biciklističke staze, mestu na kojem se može izvesti ukrštanje i merama za osiguranje bezbednog saobraćaja („Službeni glasnik RS”, br. 89/2016) tačno je određeno kada je to saobraćajno-tehnički opravdano opremiti putno-pružni prelaz automatskim polubranicama sa svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu ili branicama i saobraćajnim znacima na putu, prema kriterijumima koji se u načelu odnose na rang drumske saobraćajnice i pruge i brzinu kretanja na drumskoj saobraćajnici i pruži.

Doprinos ovog novopredloženog modela je upravo u tome da se kroz komparaciju odrede najmanje bezbedni prelazi u smislu rizika od pojave nesreća i nezgoda i dobijeni rezultati koriste za predlaganje mera za podizanje stepena obezbeđenja rizičnih putno-pružnih prelaza.

Stoga, kako bi se korisnicima lokalnog puta L-1 (Ruma-Buđanovci-Nikinci-Platičevo) dodatno pomoglo da bezbedno prelaze putno-pružni prelaz „Buđanovci”, potrebno je razmotriti opremanje ovog prelaza u nivou sa uređajima za upozorenje, ako ne sa konvencionalnim sistemima, onda bar sa nekim jeftinijim uređajima, makar do momenta kad upravljač javne železničke infrastrukture i upravljač puta donesu odluku o ulaganju finansijskih sredstava u automatizaciju navedenog prelaza. Slobodno možemo zaključiti da aktivni uređaji za upozorenja učesnika u drumskom saobraćaju, poništavaju greške korisnika drumskog saobraćaja, a samim tim i smanjuju opasnost od pojave nesreća i nezgoda.

Predlozi nekih jeftinijih rešenja su:

- ugradnja vibracionih traka u cilju „stišavanja” drumskog saobraćaja prilikom prilaska području putno-pružnog prelaza,
- poboljšanje vidljivosti prelaza preko pruge (pored apsolutnog obezbeđenja svih trouglova preglednosti otklanjanjem uočenih nepravilnosti), popločavanjem patosa putno-pružnog prelaza različitim jakim bojama,
- osvetljenjem prelaza reflektorima i ugradnjom dodatnih svetlosnih signala i laterni koji će upozoravati učesnike u drumskom saobraćaju na nailazak na putno-pružni prelaz itd..

## 6.6. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE)

Dragoslav Kuzmanović, Nebojša Vasović, Srđan Kostić, Srboľjub Simić, Igor Franović, Ines Grozdanović, Kristina Todorović-Vasović, Biljana Ranković Plazinić, Uvod u teoriju haosa, Knjiga, I izdanje, 2013; <https://www.scribd.com/document/335901940/Uvod-u-teoriju-haosa-pdf>  
Ercegovac, P.; Stojić, G.; Kopic, M.; Stević, Ž.; Sinani, F.; Tanackov, I. Model for Risk Calculation and Reliability Comparison of Level Crossings. *Entropy* **2021**, *23* (9), 1230; <https://doi.org/10.3390/e23091230>. Vidljivo na: <https://www.mdpi.com/1099-4300/23/9/1230>  
ISO31000 “Risk management – Principles and guidelines” standard, 2009. <https://www.iso.org/standard/43170.html>

- Johansson, R. (2009) Vision Zero – Implementing a policy for traffic safety, *Safety Science* Volume 47, Issue 6, July 2009, 826-831; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.023>
- Károlyi, G., Pattantyús-Ábrahám, M., & Józsa, J. (2010). Finite-size Lyapunov exponent: A new tool for lake dynamics. *Engineering and Computational Mechanics*, 163 (EM4), 251–259; <https://doi.org/10.1680/eacm.2010.163.4.251>
- K. Konishi, H. Kokame, and K. Hirata. Decentralized delayed-feedback control of an optimal velocity traffic model. *Eur. Phys. J. B*, 15: 715-722, 2000.; <https://doi.org/10.1007/s100510051176>
- Larue, G.S., Rakotonirainy, A., Haworth, N.L., Darvell, M. (2015). Assessing driver acceptance of Intelligent Transport Systems in the context of railway level crossings. *Transport. Res. Part F: Traff. Psychol. Behav.* 30, 1–13; <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.02.003>
- Larue, G.S., Rakotonirainy, A., Haworth, N.L., Ferreira, L. (2015). Driver's behavioural changes with new intelligent transport system interventions at railway level crossings—A driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention* 81,74-85; <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.02.003>
- Raikov, D. (1937). On the decomposition of Poisson laws. *Dokl. Acad. Sci. URSS*. 14: 9–11.
- Safanov, L. A., Tomer, E., Strygin, V. V., Ashkenazy, Y., & Havlin, S. (2002). Delayed-induced chaos with multi-fractal attractor in a traffic flow model. *Europhysics Letters*, 57, 151–157; <https://doi.org/10.1209/epl/i2002-00555-0>
- Tanackov, I., Sinani, F., Stanković, M., Bogdanović, V., Stević, Ž., Vidić, M., Mihaljev-Martinov, J. (2019). Natural Test for Random Numbers Generator Based on Exponential Distribution. *Mathematics*, 7 (10), 920 <https://doi.org/10.3390/math7100920>
- Vukadinović, S. Masovno opsluživanje, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- Zakon o bezbednosti saobraćaja na putevima („Sl. glasnik RS”, br. 41/2009, 53/2010, 101/2011, 32/2013 - odluka US, 55/2014, 96/2015 - dr. zakon, 9/2016 - odluka US, 24/2018, 41/2018, 41/2018 - dr. zakon, 87/2018 i 23/2019)

## 7. ZAKLJUČAK

U okviru disertacije u prva tri poglavlja dati su pregledi opštepoznatih principa i stavova u oblasti bezbednosti železničkog saobraćaja uopšte, kao i bezbednosti saobraćaja na putno-pružnim prelazima. Opisani su zakonski normativi i definicije nezgoda i nesreća u železničkom saobraćaju, putno-pružnih prelaza i propisa koji regulišu odvijanje saobraćaja na mestima ukrštaja železničkog i drumskog saobraćaja.

U trećem poglavlju posebno je dat opšti pregled modela koji se koriste za predviđanje nezgoda i nesreća na putno-pružnim prelazima, a nakon opšteg pregleda, sa više detalja su opisani neki od modela koji su bili najinteresantniji za istraživača ove doktorske disertacije i to:

- Modeli koji se primenjuju dugi niz godina u SAD, sa velikim brojem putno–pružnih prelaza i uređenom saobraćajnom politikom u ovoj oblasti koju uredno vodi Biro za javne puteve (Federal Railroad Administration–FRA), rešava probleme u ovoj oblasti i istražuje pojavu nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima. Relativne i apsolutne formule u svrhu rangiranja putno-pružnih prelaza prema stepenu rizika od sudara, kao i predviđanja broja sudara, razvijale su se u SAD-u još od 1940. godine. Mnoge od ovih formula su još uvek u širokoj upotrebi od strane državnih institucija koje se bave bezbednošću saobraćaja.
- Dat je pregled modela za predviđanje nesreća i nezgoda u Severnoj Dakoti;
- Modeli za predviđanje nezgoda i nesreća koje je podržala Francuska nacionalna železnička kompanija (SNCF Reseau), a rađeni su od strane veće grupe istraživača kroz tri faze (preliminarnan, poboljšan i baziran na Bajesovoj analizi). Svi modeli su rađeni na istom uzorku, a iznalaženo je najbolje moguće rešenje;
- Modeli za predviđanje u Mađarskoj.

Za sve modele su navedene prednosti i nedostaci, kao i mogućnosti za dalje istraživanje i poboljšanje.

U četvrtom poglavlju, izvršena je teorijska priprema i izložen samo mali deo matematičkog aparata iz oblasti verovatnoće, slučajnih procesa i teorije masovnog opsluživanja sa osnovnim definicijama, teoremama, formulama i dokazima. Pod pretpostavkom da je ova oblast poznata istraživačima, ali zbog manje upotrebe korišćenih alata, smatra se da je oblast sa skraćenim teorijskim pregledom, zaslužno zauzela svoje mesto u ovom radu.

U petom poglavlju opisani su izvori podataka i navedene korišćene baze podataka. Posebno je urađena statistička analiza posmatranog uzorka.

U šestom poglavlju postavljena je osnova novog matematičkog modela sa grafom stanja, objašnjenjem prelaznih stanja, proračunom verovatnoća stanja i određivanjem teorijske verovatnoće sudara železničkih i drumskih vozila u tački konflikta, putno-pružnom prelazu. Idealni bezbednosni uslovi sa nultim brojem nesreća i nezgoda, predstavljaju idealno funkcionisanje sistema sa teorijski minimalnim rizikom.

Teorijski minimalan rizik predstavlja prvu inženjersku granicu. Maksimalan broj teorijskih nezgoda ili nesreća se može realizovati u odsustvu raspodele prioriteta, tj. u teoriji haosa. Time se dobija maksimalan broj nezgoda ili nesreća koji predstavlja maksimum rizika od nastanka nezgode ili nesreće.

Na ovaj način određuje se druga inženjerska granica. Realan rizik se nalazi u granicama između maksimalnog i minimalnog rizika.

Izvršen je proračun verovatnoće maksimalnog rizika  $p_{\text{theor}}$ , usvojena verovatnoća realnog rizika  $p_{\text{real}}$  koja predstavlja odnos broja realizovanih nesreća i nezgoda u posmatranom vremenskom periodu i intenziteta drumskih vozila  $\lambda c$ . Određen je nivo sintetičke pouzdanosti i bezbednosti za svaki posmatrani putno-pružni prelaz R, kao i komplementarna vrednosti sintetičkoj pouzdanosti izračunat je rizik r.

Na osnovu proračunatog nivoa sintetičke pouzdanosti i bezbednosti R i rizika r, bilo je moguće izvršiti komparaciju rizika od pojave nesreća i nezgoda između proizvoljno odabranih putnih prelaza što je i učinjeno i predloženim novim modelom određen je najmanje bezbedan putno-pružni prelaz. Za predložen model, kroz urađenu validaciju potvrđeni su rezultati koji imaju smisla i odgovaraju stvarnom i činjeničnom stanju.

U modelu su inkorporirane stvarne (realizovane) i teorijske moguće (u smislu kapaciteta opsluge) frekvencije drumskog i železničkog saobraćaja i realizovane nesreće i nezgode na posmatranim putno-pružnim prelazima u periodu od skoro 11 godina, tačnije od 2007. godine do novembra 2017. godine.

Izvršena je komparacija nivoa bezbednosti (grafik 6.1), odnosno pouzdanosti R(B), izračunata vrednosti rizika r (grafik 6.2) za pet putno-pružnih prelaza i izvršeno je njihovo rangiranje.

Kao napouzdaniji putno-pružni prelaz u odabranoj grupi prelaza dobijen je putno-pružni prelaz Platičevo sa R(B)=0,999986629 i rizikom od pojave nesreće/nezgode  $r=1,33707 \times 10^{-5}$ , na drugom mestu nalazi se putno-pružni prelaz u Štitaru sa R(B)=0,999942934 i sa rizikom od pojave nesreće/nezgode  $r=5,70662 \times 10^{-5}$ , na trećem mestu se nalazi putno-pružni prelaz u Kraljevcima sa R(B)= 0,999908404 i sa rizikom od pojave nesreće/nezgode  $r=9,15965 \times 10^{-5}$ , zatim sledi putno-pružni prelaz u Brasini sa R(B)=0,999839083 i sa rizikom od pojave nesreće/nezgode  $r=0,000160917$  i kao najmanje pouzdan, dobijen je putno-pružni prelaz u Buđanovcima sa R(B)=0,99961713 i rizikom od pojave nesreće/nezgode  $r=0,00038287$ .

Dobijen rezultat je diskutovan, sa detaljnim tehničko-tehnološkim opisom dobijenog najmanje pouzdanog i bezbednog putno-pružnog prelaza „Buđanovci” i dat je predlog nekoliko jeftinih rešenja za poboljšanje nivoa bezbednosti na analiziranom putno-pružnom prelazu, koja i bez dubljih i većih daljih analiza mogu odmah da se primene.

Hipoteza ove doktorske disertacije i sprovedenog istraživanja, postavljena u delu 1.4. ovog rada, je potvrđena.

Prednost ovog modela, za upravljača infrastrukture i upravljača puta, leži u činjenici, da je korišćenjem metodologije vršenja analize pouzdanosti i komparacije rizika na svim opserviranim putno-pružnim prelazima moguće rešiti problem određivanja prioriteta pri odabiru putno-pružnih prelaza na kojima je neophodno podići nivo obezbeđenja saobraćaja. Ovo predstavlja veliki doprinos, imajući u vidu ograničena finansijska sredstva, a neograničenu želju za podizanjem nivoa bezbednosti saobraćaja<sup>49</sup>.

---

<sup>49</sup> Ercegovac, P.; Stojić, G.; Kopic, M.; Stević, Ž.; Sinani, F.; Tanackov, I. Model for Risk Calculation and Reliability Comparison of Level Crossings. *Entropy* **2021**, *23* (9), 1230; <https://doi.org/10.3390/e23091230>

Utvrđivanje modela za procenu i komparaciju rizika od nastanka nesreća i nezgoda, predstavlja originalan i sasvim nov pristup u analizi bezbednosti putno-pružnih prelaza.

Predloženi model i prikazani rezultati ne nose imperativ pretenzije konačne forme modela. Primena maksimalne probabilističke entropije je premijerno i uspešno izvedena u cilju kvantifikacije maksimalnog rizika koji je dokazano konvergentan. Uz idealnu vrednost minimalnog rizika koji je uvek ideal apsolutne bezbednosti, deklarisan je neophodni inženjerski interval: od nultog rizika do maksimalnog rizika. On je zaista moćan i može se primeniti i za homogene sisteme drumskog saobraćaja na raskrscima, ili u drugim saobraćajnim sistemima, generalno, na sve konfliktne saobraćajne tokove.

Komparacija rizika na putno-pružnim prelazima se zasniva na statističkom podatku: broju nesreća i nezgoda. Instalacija novih ili rekonstrukcija postojećih putno-pružnih prelaza bitno utiče na smanjenje ove vrednosti. Za poznate geometrijske karakteristike i intenzitete tokova, predloženi model daje mogućnost preliminarnog proračuna maksimalnog rizika kao polazne referentne vrednosti narednih istraživanja i elaboriranja bezbednosti saobraćaja. Takođe, model sa lakoćom može da komparira putno-pružne prelaze različitih nivoa osiguranja, ili putne prelaze istog nivoa osiguranja, instalirane od različitih proizvođača.

Predloženi model je eksplicitno obuhvatio samo osnovne parametre. Implicitno, postoji veliki broj probabilističkih parametara na putno-pružnim prelazima: prosečne senzorne i motoričke sposobnosti vozača, kultura i navike vozača, pouzdanost signalno-sigurnosnih uređaja, kvalitet kolovoza na putno-pružnom prelazu, vidljivost (meteorološka), doba dana, temperatura i vlažnost vazduha, čujnost akustičnih uređaja, težina realizovanih nesreća/nezgoda (broj povređenih/nastradalih) itd. Svi navedeni parametri su implicitno obuhvaćeni kroz samo jedan statistički podatak: broj nesreća/nezgoda.

S obzirom na užu naučnu oblast ovog rada koja se odnosi na bezbednost saobraćaja pravci daljih istraživanja mogu se ogledati u sledećem:

- Primena predloženog modela na rešavanju problema nesignalisanih raskrscica u drumskom saobraćaju, gde će određivanjem sintetičke pouzdanosti i rizika za svaku posmatranu nesignalisanu raskrscicu, metodom komparacije odrediti najmanje bezbedna. To će omogućiti podizanje nivoa bezbednosti u drumskom saobraćaju;
- Primena drugih metoda koje će u kombinaciji sa postojećim predloženim modelom ili dodatim kriterijumima, formirati novi, poboljšani model za procenu rizika od pojave nesreća i nezgoda na putno-pružnim prelazima;
- U budućim radovima i istraživanjima, svi napred navedeni probabilističkih parametri (prosečne senzorne i motoričke sposobnosti vozača, kultura i navike vozača, pouzdanost signalno-sigurnosnih uređaja, kvalitet kolovoza na putno-pružnom prelazu, vidljivost, doba dana, temperatura i vlažnost vazduha, čujnost akustičnih uređaja, težina realizovanih nesreća/nezgoda u smislu broja povređenih/nastradalih itd...) se mogu uvesti u model posebnim analitičkim funkcijama, uz jedan obavezan princip: bez obzira na njihov determinističku ili probabilističku strukturu, maksimalna probabilistička entropija mora biti očuvana primenom eksponencijalne raspodele.

Zaključak i doprinos ove doktorske disertacije je, ne samo na smanjenju pojave nesreća i nezgoda, nego i očuvanju ljudskih života, što predstavlja značajan doprinos nauci, nemerljiv opštepoznatim veličinama. Ideja koja nalazi utemeljenje u ovakvom stavu, nalazi se u radu „Vision Zero”, koji je uspostavio politiku bezbednosti saobraćaja u Švedskoj još 1997. godine, a čije smernice su usvojene još u nekim zemljama, a to je, da svako saobraćajno okruženje treba da bude izgrađeno na takav način, da ljudske greške neće dovesti do smrti ili teških povreda učesnika u saobraćaju (Roger Johansson, 2009).

### 7.1. SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE (REFERENCE)

Johansson, R. (2009) Vision Zero – Implementing a policy for traffic safety, Safety Science Volume 47, Issue 6, July 2009, 826-831; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.023>

## 8. LITERATURA

- Abdel-Aty, M.A., Radwan, A.E. (2000). Modeling traffic accident occurrence and involvement. *Accident Analysis and Prevention* 32 (5), 633–642. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(99\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00094-9)
- Agencija za bezbednost saobraćaja RS, 2018. Studija „Istraživanje stanja bezbednosti saobraćaja u zonama pružnih prelaza”  
<https://www.abs.gov.rs/admin/upload/documents/Istra%20c5%beivanje%20stanja%20bezbednosti%20%20saobra%20c4%87aja%20u%20zonama%20pru%20c5%benih%20prelaza.pdf>
- Aguero-Valverde, J., Jovanis, P. (2008) Analysis of Road Crash Frequency with Spatial Models. *Transportation Research Record*, 2061, 55-63. <https://doi.org/10.3141/2061-07>
- Al-Seedy RO, Al-Ibraheem FM. New transient solution to the M/M/1 queue with varying arrival and departure rate. *Applied Mathematics and Computation* 2003; 135 (2–3): 425–428;
- Al-Seedy RO, El-Sherbiny AA, El-Shehawy SA, Ammar SI. The transient solution to a time-dependent single-server queue with balking. *The Mathematical Scientist* 2009; 34 (2): 113–118;
- Andersson J. et al. (2006). Roadside Infrastructure for Safer European Roads, European best practice for roadside design: guidelines for maintenance and operations of roadside infrastructure, Chalmers University of Technology; <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/2204>
- Austin, R.D., Carson J.L. (2002) .An alternative accident prediction model for highway-rail interfaces. *Accident Analysis and Prevention* 34 (1), 31–42; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00100-7](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00100-7)
- Baysari M. T.; McIntosh A. S.; Wilson J. R. (2008). Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia, *Accident Analysis and Prevention* Volume 40, Issue 5, September 2008, Pages 1750-17; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.06.013>
- Blagojević, A., Kasalica, S., Stević, Ž., Tričković, G., and Pavelkić, V. (2021). Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model, *Sustainability* 2021,13, 832.  
<https://doi.org/10.3390/su13020832>
- Bookbinder JH, Martell DL. Time-dependent queueing approach to helicopter allocation for forest fire initial-attack. *INFOR* 1979; 17 (1): 58–70;
- Bookbinder JH. Multiple queues of aircraft under time-dependent conditions. *INFOR* 1986; 24 (4): 280–288;
- Borsos, A., Gabor, M., Koren, C. (2016). Safety Ranking of Railway Crossings in Hungary. *Transportation Research Procedia*, Volume 14, 2111-2120  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.226>
- Bošković B., Bugarinović M. (2015). Why and how to manage the process of liberalization of a regional railway market: South-Eastern European case study, *Transport Policy* Volume: 41 50-59 Publisher: Elsevier; <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.03.009>



- Bouillaut, L., Francois, O., Dubois, S. (2013). A bayesian network to evaluate underground rails maintenance strategies in an automation context. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 227 (4), 411–424.  
<https://doi.org/10.1177%2F1748006X13481306>
- Carroll J.S., Fahlbruch B. (2011). „The gift of failure: new approaches to analyzing and learning from events and near-misses.” *Honoring the contributions of Bernhard Wilpert, Safety Science* 49 (1), 1–4; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.03.005>
- Cedergren A., Petersen K. (2011). Prerequisites for learning from accident investigations– a cross-country comparison of national accident investigation boards. *Safety Science* 49 (8/9), 1238–1245; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.04.005>
- Cedergren A. (2013). Implementing recommendations from accident investigations: A case study of inter-organisational challenges, *Accident Analysis and Prevention* 53 (2013) 133–141; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.01.010>
- Chemweno, P., Pintelon, L., Van Horenbeek, A., and Muchiri, P. (2015). Development of a risk assessment selection methodology for asset maintenance decision making: An analytic network process (anp) approach. *International Journal of Production Economics*, 170, 663–676.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.03.017>
- Chin, H., Quddus MA. (2003). Applying the random effect negative binomial model to examine traffic accident occurrence at signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention* 35(2): 253–259; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00003-9)
- Clarke AB. A waiting line process of Markov type. *The Annals of Mathematical Statistics* 1956; 27 (2): 452–459;
- Clark GM. Use of polya distributions in approximate solutions to nonstationary M/M/s queues. *Communications of the ACM* 1981; 24 (4): 206–217;
- Clark H. E.; Perrone J. A.; Isler R. B. (2013). An illusory size–speed bias and railway crossing collisions, *Accident Analysis and Prevention* 55, 226– 231;  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2013.02.037>
- Czachórski T, Nycz T, Pekergin F. Diffusion approximation models for transient states and their application to priority queues. *International Journal On Advances in Networks and Services* 2009; 2 (2 and 3): 205–217;
- Direktiva 2004/49/EZ Evropskog Parlamenta o bezbednosti na železnici i njenim implementacionim aktima, Službeni list broj L 220/16, 21.6.2004.
- Donnell, E.T., Mason, J.M. Jr. (2006). Predicting the Frequency of Median Barrier Crashes on Pennsylvania Interstate Highways. *Accident, Analysis and Prevention*, Vol.38. No. 3, 590–599  
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.12.011>
- Dragoslav Kuzmanović, Nebojša Vasović, Srđan Kostić, Srboľjub Simić, Igor Franović, Ines Grozdanović, Kristina Todorović-Vasović, Biljana Ranković Plazinić, *Uvod u teoriju haosa*, Knjiga, I izdanje, 2013; <https://www.scribd.com/document/335901940/Uvod-u-teoriju-haosa-pdf>
- Edkins G. D., Pollock C. M. (1997). The influence of sustained attention on Railway accidents,

- Accident Analysis and Prevention, 29 (4), 533-539; [http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575\(97\)00033-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575(97)00033-X)
- El-Basyouny, K. , Sayed, T. (2006) Comparison of Two Negative Binomial Regression Techniques in Developing Accident Prediction Models. Transportation Research Record, 1950, issue: 1, 9-16. <https://doi.org/10.1177/0361198106195000102>
- El-Sherbiny AA. Transient solution to an infinite server queue with varying arrival and departure rate. Journal of Mathematics and Statistics 2010; 6 (1): 1–3;
- Ercegovac Pamela (2006). Magistarski rad „Istraživanje uticaja nekih karakteristika železničkog izvršnog osoblja na nastanak vanrednih događaja”, Sobračajni fakultet Beograd, 27.09.2006.godine;
- Ercegovac, P.; Stojić, G.; Kopic, M.; Stević, Ž.; Sinani, F.; Tanackov, I. Model for Risk Calculation and Reliability Comparison of Level Crossings. *Entropy* **2021**, 23 (9), 1230; <https://doi.org/10.3390/e23091230>
- Escobar M, Odoni AR, Roth E. Approximate solution for multi-server queueing systems with Erlangian service times. Computers & Operations Research 2002; 29 (10): 1353–1374;
- European Railway Agency (ERA), 2014. Intermediate report on the development of railway safety in the European Union, European Railway Agency, Safety Unit; [www.era.europa.eu](http://www.era.europa.eu)
- Evans A. W.; Verlander N. Q. (1996). Estimating the consequences of accidents: The case of automatic train protection in Britain, *Accid. Anal. Prev.* Vol. 28, No. 2, 181-191, 1996. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(95\)00057-7](https://doi.org/10.1016/0001-4575(95)00057-7)
- Evans A. W. (2007). Rail safety and rail privatisation in Britain, *Accident Analysis and Prevention* 39 (3): 510–523; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.09.007>
- Evans A.W. (2010). Rail safety and rail privatisation in Japan. *Accident Analysis and Prevention* 42, 1296–1310; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.02.007>
- Evans A. W. (2011a). Fatal train accidents on Europe’s railways: 1980–2009, *Accident Analysis and Prevention* 43 (1): 391–401; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.09.009>
- Evans W.A. (2011b). Fatal accidents at railway level crossings in Great Britain 1946 –2009, *Accident Analysis and Prevention* 43 1837–184 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.04.019>
- Evans A. W. (2013). The economics of railway safety, *Research in Transportation Economics* 43 137-147; <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.12.003>
- E. Koenigsberg, Is queueing theory dead?, *Omega* Volume 19, Issues 2–3, 1991, 69-78, [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(91\)90017-N](https://doi.org/10.1016/0305-0483(91)90017-N)
- Faghry, A., Demetsky, M.J. (1986). Comparison of Formulae for predicting Rail-Highway crossing hazards. *Transportation research record*, 1114; <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1114/1114-016.pdf>
- Federal Highway Administration – FHWA; <https://safety.fhwa.dot.gov/hsip/xings/>
- Federal Railroad Administration–FRA; <https://www.fra.dot.gov/>
- Ghazel M. (2009). Using stochastic Petri nets for level-crossing collision risk assessment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10 (4), 668–677;

<https://doi.org/10.1109/TITS.2009.2026310>

- Ghazel M., El-Koursi E.-M. (2014). Two-half-barrier level crossings versus four half-barrier level crossings: a comparative risk analysis study. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15 (3), 1123–1133; <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2294874>
- Gillard J, Knight V. Using singular spectrum analysis to obtain staffing level requirements in emergency units. *Journal of the Operational Research Society* 2014; 65 (5): 735–746;
- Goran Ćirović and Dragan Pamučar (2013). Decision support model for prioritizing railway level crossings for safety improvements: Application of the adaptive neuro-fuzzy system, *Expert Systems with Applications* 40 (2013) 2208–2223; <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.10.041>
- Green L, Kolesar P. The pointwise stationary approximation for queues with nonstationary arrivals. *Management Science* 1991; 37 (1): 84–97;
- Green L, Kolesar P, Svoronos A. Some effects of nonstationarity on multi-server Markovian queueing systems. *Operations Research* 1991; 39 (3): 502–511;
- Green LV, Kolesar PJ. On the accuracy of the simple peak hour approximation for Markovian queues. *Management Science* 1995; 41 (8): 1353–1370;
- Green LV, Kolesar PJ. The lagged PSA for estimating peak congestion in multiserver Markovian queues with periodic arrival rates. *Management Science* 1997; 43 (1): 80–87;
- Grujić S., Popović M., Savić G., Pamučar D., (2018). Safety assessment of railway crossings in Serbia using DEA method, *XLV Symposium on Operational Research, SYM-OP-IS 2018 Zlatibor, Serbia 16-19 September 2018*. [http://cea.fon.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2019/01/Grujic\\_Popovic\\_Savic\\_Pamucar-SymOpIs2018final.pdf](http://cea.fon.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2019/01/Grujic_Popovic_Savic_Pamucar-SymOpIs2018final.pdf)
- Hauer, E. (2001). Overdispersion in modelling accidents on road sections and in Empirical Bayes estimation. *Accident, Analysis and Prevention*, 33(6), 799–808; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00094-4)
- Heragu S.S. and S.R. Kakuturi (1997). Grouping and placement of machine cells, *IIE Transactions*, 29 (7), 561–571; <https://doi.org/10.1023/A:1018549413468>
- Hillier S. Frederick, Lieberman J. Gerald (2001), *Introduction to Operations Research*, Seventh Edition; <https://catalog.libraries.psu.edu/catalog/2091516>
- Hinčin A. Ja : Raboti po matematičkoj teoriji masovovo obsluživanja, Moskva, 1966; [https://sr.wikipedia.org/wiki/Stohasti%C4%8Dki\\_proces](https://sr.wikipedia.org/wiki/Stohasti%C4%8Dki_proces)  
<https://www.putevi-srbije.rs/index.php/бројање-саобраћаја>
- Ihsan, U.K., Lee, E.S., Muhammad, A.K. (2018). Developing a Highway Rail Grade Crossing Accident Probability Prediction Model: A North Dakota Case Study. *Safety* 2018, 4 (2), 22; <https://doi.org/10.3390/safety4020022>
- Ingolfsson A, Haque AM, Umnikov A. Accounting for time-varying queueing effects in workforce scheduling. *European Journal of Operational Research* 2002; 139 (3): 585–597;

- Ingolfsson A, Akhmetshina E, Budge S, Li Y, Wu X. A survey and experimental comparison of service-level-approximation methods for nonstationary M(t)/M/s(t) queueing systems with exhaustive discipline. *INFORMS Journal on Computing* 2007; 19 (2): 201–214;
- Ivo Adan, Jacques Resing, *Queueing Systems*, Department of Mathematics and Computing Science, Eindhoven University of Technology, Eindhoven 2015;
- Jacquillat A, Odoni AR. Endogenous control of service rates in stochastic and dynamic queueing models of airport congestion. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 2015; 73: 133–151;
- Johansson, R. (2009) Vision Zero – Implementing a policy for traffic safety, *Safety Science* Volume 47, Issue 6, July 2009, 826-831; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.023>
- Jovanis, P. P., Chang, H. (1986). Modeling the relationship of accidents to miles traveled; *Transportation Research Record*, No. 1068, TRB, National Research Council; [http://www.honolulutraffic.com/Admin\\_Record/Administrative\\_Record\\_rev\\_2.28.12/Administrative\\_Record\\_Volumes\\_1-11/Vol002\\_AR00028614/AR00029621.pdf](http://www.honolulutraffic.com/Admin_Record/Administrative_Record_rev_2.28.12/Administrative_Record_Volumes_1-11/Vol002_AR00028614/AR00029621.pdf)
- Jung M, Lee ES. Numerical optimization of a queueing system by dynamic programming. *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 1989; 141 (1): 84–93;
- Jung W. Recoverable inventory systems with time-varying demand. *Production and Inventory Management Journal* 1993; 34 (1): 77–81;
- Justus Arne Schwarz, Gregor Selinka and Raik Stolletz (2016): Performance analysis of time-dependent queueing systems: Survey and classification *Omega* Volume 63, September 2016, 170-189: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.10.013>;
- J. D. Little, A proof of the queueing formula  $L = \lambda W$ , *Opns. Res.*, 9 (1961), 383-392;
- Kadane, J. B., Galit, S., Minka, T.P., Borlex, S., Boatwright, P. (2006). Conjugate Analysis of the Conway-Maxwell-Poisson Distribution. *Bayesian Analysis*, Volume 1, Number 2, 363-374; [DOI: 10.1214/06-BA113](https://doi.org/10.1214/06-BA113)
- Karlin S. : *Osnovi teoriji slučajnih procesov*, Moskva, 1971;
- Károlyi, G., Pattantyús-Ábrahám, M., & Józsa, J. (2010). Finite-size Lyapunov exponent: A new tool for lake dynamics. *Engineering and Computational Mechanics*, 163 (EM4), 251–259; <https://doi.org/10.1680/eacm.2010.163.4.251>
- Kasalica, S. , Obradović M., Blagojević, A., Jeremić, D., Vuković, M., (2020) Models for ranking railway crossings for safety improvement. *Oper. Res. Eng. Sci. Theory Appl.* 2020, 3, 85–100 <https://doi.org/10.31181/oresta20303085k>
- Kendall, D.G. (1951) Some problems in the theory of queues. *J. Roy. Statist. Soc.(B)* 13 (2), 151–185
- Kendall D.G. (1953). Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chain, *The Annals of Mathematical Statistics* Volume 24, Number 3, 338-354
- Keramati, A., Lu, P., Zhou, X. and Tolliver, D. (2020). A Simultaneous Safety Analysis of Crash

- Frequency and Severity for Highway-Rail Grade Crossings: The Competing Risks Method. *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2020, Article ID 8878911, 13.  
<https://doi.org/10.1155/2020/8878911>
- Kofman A., Krjun R.: *Masovoe obsluživanje, teorija i priloženija*, Moskva, 1965;
- Kolesar PJ, Rider KL, Crabill TB, Walker WE. A queuing-linear programming approach to scheduling police patrol cars. *Operations Research* 1975; 23 (6): 1045–1062;
- Kolmogorov A. Sur le problème d'attente. *Matematicheskii Sbornik* 1931; 38 (1–2): 101–106 (in French);
- Koopman BO. Air-terminal queues under time-dependent conditions. *Operations Research* 1972; 20 (6): 1089–1114 (1931);
- K. Konishi, H. Kokame, and K. Hirata. Decentralized delayed-feedback control of an optimal velocity traffic model. *Eur. Phys. J. B*, 15: 715–722, 2000;  
<https://doi.org/10.1007/s100510051176>
- Lambert, D. (1992). Zero-Inflated Poisson Regression, with an Application to Defects in Manufacturing, *American Statistical Association and the American Society for Quality Control*, Vol. 34, No. 1, 11–14, 1992; [DOI: 10.1080/00401706.1992.10485228](https://doi.org/10.1080/00401706.1992.10485228)
- Langseth, H., Portinale, L. (2007). Bayesian networks in reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 92 (1), 92–108. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.037>
- Larue G.S., Rakotonirainy A., Haworth N.L., Darvell M. (2015). Assessing driver acceptance of Intelligent Transport Systems in the context of railway level crossings. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 30, 1–13; <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.02.003>
- Larue, G.S., Rakotonirainy, A., Haworth, N.L., Ferreira, L. (2015). Driver's behavioural changes with new intelligent transport system interventions at railway level crossings—A driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention* 81, 74–85; <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.02.003>
- Lau HC, Song H. Multi-echelon repairable item inventory system with limited repair capacity under nonstationary demands. *International Journal of Inventory Research* 2008; 1 (1): 67–92;
- Leese EL, Boyd DW. Numerical methods of determining the transient behaviour of queues with variable arrival rates. *Journal of the Canadian Operational Research Society* 1966; 4 (1): 1–13;
- Leese EL, Boyd DW. Numerical methods of determining the transient behaviour of queues with variable arrival rates. *Journal of the Canadian Operational Research Society* 1966; 4 (1): 1–13;
- Lee A. (1966). *Applied Queuing Theory*. New York. St Martin's Press. P. 45;  
<https://doi.org/10.1080/01621459.1968.11009254>
- Lee, J., Mannering, F. (2002). Impact of Roadside Features on the Frequency and Severity of Run-Off-Roadway Accidents: An Empirical Analysis. *Accident Analysis and Prevention*, 41, 798–808; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(01\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00009-4)
- Lerner, N.D.; Llaneras, R.E.; McGree, H.W.; Stephens, D.E. (2002). *Traffic Control Devices for Passive Railroad-Highway Grade Crossings*; National Cooperative Highway Research Program;

- Report 470. Transportation Research Board: Washington, DC, USA, 2002; <http://worldcat.org/isbn/0309067510>
- Liang, Ci., Ghazel, M., Cazier, O., Koursi E.M.E. (2017). Developing accident prediction model for railway level crossings. *Safety Science*, Volume 101, January 2018, 48-59; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.08.013>
- Liang, Ci., Ghazel, M., Cazier, O. (2018) Using Bayesian Networks for the Purpose of Risk Analysis at Railway Level Crossings. *IFAC-PapersOnLine* Volume 51, Issue 9, 2018, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.024>
- Lipovac K., Jovanović, D. (2008). Mapiranje rizika na putnoj mreži Srbije, Zbornik radova, IX Simpozijum sa međunarodnim učešćem „Prevenција saobraćajnih nezgoda na putevima 2008 ”, Novi Sad, 23. i 24. 10. 2008.
- Liu B., Ghazel M., Toguyeni A. (2016). Model-based diagnosis of multi-track level crossing plants, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17 (2), 546–556; <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2478910>
- Lobb B.; Harré N.; Terry N. (2003). An evaluation of four types of railway pedestrian crossing safety intervention, *Accident Analysis and Prevention* 35 (4): 487–494; [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00026-X)
- Lord, D., Guikema S. D., Geedipally, S.R. (2008). Application of the Conway–Maxwell–Poisson generalized linear model for analyzing motor vehicle crashes. *Accident, Analysis and Prevention*, Volume 40, Issue 3, 1123-1134; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.12.003>
- Lord, D., Miranda-Moreno, L.F. (2008); Effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter of Poisson-gamma models for modeling motor vehicle crashes. A Bayesian perspective. *Safety Science*, 46, 751-770; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.03.005>
- Luchak G. The solution of the single-channel queuing equations characterized by a time-dependent Poisson-distributed arrival rate and a general class of holding times. *Operations Research* 1956; 4 (6): 711–73;
- Luchak G. The distribution of the time required to reduce to some preassigned level a single-channel queue characterized by a time-dependent Poisson-distributed arrival rate and a general class of holding times. *Operations Research* 1957; 5 (2): 205–209;
- Lundberg J., Rollenhagen C., Hollnagel E. (2010). What you find is not always what you fix-How other aspects than causes of accidents decide recommendations for remedial actions. *Accident Analysis and Prevention* 42 (6) 2132–2139; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.07.003>
- Lyubarskii GY. Busy time of a nonstationary single-channel service system and related questions. *Automation and Remote Control* 1982; 43 (12): 1537–1543;
- Maher, M.J., Summersgill, I. A. (1996). Comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. *Accident Analysis and Prevention* 28, 281-296; [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(95\)00059-3](https://doi.org/10.1016/0001-4575(95)00059-3)
- Malyshkina, N.V., Mannering, F. (2010). Empirical assessment of the impact of highway design

- exceptions on the frequency and severity of vehicle accidents. *Accident Analysis and Prevention* 42 (1): 131-139; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.07.013>
- Margolius BH. A sample path analysis of the  $M_t/M_t/c$  queue. *Queueing Systems* 1999; 31 (1-2): 59-93;
- Margolius BH. Transient solution to the time-dependent multiserver Poisson queue. *Journal of Applied Probability* 2005; 42 (3): 766-777;
- Margolius BH. Transient and periodic solution to the time-inhomogeneous quasi-birth death process. *Queueing Systems* 2007; 56 (3-4): 183-194;
- Margolius BH. The matrices R and G of matrix analytic methods and the time-inhomogeneous periodic quasi-birth-and-death process. *Queueing Systems* 2008; 60 (1-2): 131-151;
- Massey WA, Whitt W. Peak congestion in multi-server service systems with slowly varying arrival rates. *Queueing Systems* 1997; 25 (1-4): 157-172;
- Massey WA, Pender J. Gaussian skewness approximation for dynamic rate multi-server queues with abandonment. *Queueing Systems* 2013; 75 (2-4): 243-277;
- Maycock, G., R. D. HALL (1984). Accidents at 4-arm roundabouts. TRL Laboratory Report LR 1120. Crowthorne: book
- Mekki A., Ghazel M., Toguyeni A. (2012). Validation of a new functional design of automatic protection systems at level crossings with model-checking techniques. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (2), 714-723; <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2178238>
- Miaou, S.P., Lum, H. (1993). Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationship. *Accident Analysis and Prevention* 25, 689-709; [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(93\)90034-T](https://doi.org/10.1016/0001-4575(93)90034-T)
- Miaou, S.P. (1994). The relationship between truck accidents and geometric design of road sections: Poisson versus negative binomial regressions. *Accident Analysis and Prevention* 26 (4), 471-482. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)90038-8)
- Miaou, S.-P., Bligh, R. P., Lord, D. (2005). Developing median barrier installation guidelines: A benefit/cost analysis using Texas data. *Transportation Research Record*, 1904, 2-19; <https://doi.org/10.1177/0361198105190400101>
- Milton, J. , Mannering, F. (1998); The relationship among highway geometrics, traffic-related elements and motor-vehicle accident frequencies. *Transportation* November 1998, Volume 25, Issue 4, 395-413; <https://doi.org/10.1023/A:1005095725001>
- M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, and A. Nakayama. Delay of Vehicle Motion in Traffic Dynamics. Internal Report Aichi University, 1996; <https://arxiv.org/abs/patt-sol/9608002v1>
- M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, and A. Nakayama. Analysis of optimal velocity model with explicit delay. *Phys. Rev. E*, 58: 5429-5435, 1998. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.58.5429>
- Nasr WW, Taaffe MR. Fitting the  $Ph_t/M_t/s/c$  time-dependent departure process for use in tandem queueing networks. *INFORMS Journal on Computing* 2013; 25 (4): 758-773;
- Nelson BL, Taaffe MR. The  $Ph_t/Ph_t/\infty$  queueing system: part I-the single

- node. *INFORMS Journal on Computing* 2004; 16 (3): 266–274 ;
- Nixon J., Corcoran A., Fielding L. and Eastgate J. (1985). Fatal and nonfatal accidents on the railways – a study of injuries to individuals, with particular reference to children and to nonfatal trauma, *Accident Analysis and Prevention* Vol 17, No 3, 217-222; [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(85\)90054-5](https://doi.org/10.1016/0001-4575(85)90054-5)
- Novikov O.A. , Petuhov S.I., *Prikladnie voprosi teorii masovovo obsluživanja*, Moskva, 1969
- Nozari A. Control of entry to a nonstationary queuing system. *Naval Research Logistics Quarterly* 1985; 32 (2): 275–286;
- Oh, J., Washington, S.P., Nama, D.(2006). Accident prediction model for railway-highway interfaces. *Accident Analysis and Prevention* 38(2), 346–356; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.10.004>
- Ong KL, Taaffe MR. Approximating nonstationary PH(t)/PH(t)/1/c queueing systems. *Mathematics and Computers in Simulation* 1988; 30 (5): 441–452;
- Parlar M. Optimal dynamic service rate control in time dependent M/M/S/N queues. *International Journal of Systems Science* 1984;15 (1): 107–118;
- Pasha, J., Dulebenets, M.A., Abioye, O. F., Kavooosi, M., Moses, R., Sobanjo, J., Ozguven, E. E. (2020). A Comprehensive Assessment of the Existing Accident and Hazard Prediction Models for the Highway-Rail Grade Crossings in the State of Florida. *Sustainability* 2020, 12 (10), 4291; <https://doi.org/10.3390/su12104291>
- Pender J. A Poisson–Charlier approximation for nonstationary queues. *Operations Research Letters* 2014; 42 (4): 293–298;
- Pender J. Gram charlier expansion for time varying multiserver queues with abandonment. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 2014; 74 (4): 1238–1265;
- Perrow C. (1987). *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*. Social Science & Medicine Volume 31, Issue 10, 1990, 187, Basic Books, New York; [https://doi.org/10.1016/0277-9536\(90\)90240-S](https://doi.org/10.1016/0277-9536(90)90240-S)
- Poch, M., Mannering, F. (1996). Negative Binomial Analysis of Intersection Accident Frequencies. *Journal of Transportation Engineering* Vol. 122, Issue 2 (March 1996); <https://doi.org/10.1061/%28ASCE%290733-947X%281996%29122%3A2%28105%29>
- Pravilnik o prijavljivanju, istraživanju, evidentiranju, statističkom praćenju i objavljivanju podataka o nesrećama i nezgodama („Službeni glasnik RS”, broj 32/2021 od 02.04. 2021. godine);
- Pravilnik o načinu ukrštanja železničke pruge i puta, pešačke ili biciklističke staze, mestu na kojem se može izvesti ukrštanje i merama za osiguranje bezbednog saobraćaja („Službeni glasnik RS”, br. 89/2016);
- Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji („Službeni glasnik RS”, br. 85/2017 i 14/2021);
- Pravilnik o vrstama signala, signalnih oznaka i oznaka na pruži („Sl. glasnik RS” broj 51/20 od 14.04. 2020. godine);
- Pravilnik o zajedničkim pokazateljima bezbednosti u železničkom saobraćaju („Službeni glasnik RS” broj 25 od 03.04. 2019. godine);
- Pribyl, O. and K. G. Goulias (2005). Simulation of daily activity patterns. In H. J. P. Timmermans (Ed.). *Progress in Activity-based Analysis*, Oxford, Pergamon, 43-66;



<https://doi.org/10.1177/0361198105192600116>

- P. Mengert, P., Farr E.H. (1980). Rail-Highway crossing accident prediction research results-FY80. Transportation Systems Center Cambridge MA 02142
- Raikov, D. (1937). On the decomposition of Poisson laws. Dokl. Acad. Sci. URSS. 14: 9–11.
- Read G.J., Salmon P.M., Lenné M.G., Stanton N.A. (2016), Walking the line: understanding pedestrian behaviour and risk at rail level crossings with cognitive work analysis. Applied Ergonomics 53, 209–227; <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.10.004>
- Reason J. (1990). Book Human Error. Cambridge University Press, Cambridge; <https://doi.org/10.1017/CBO9781139062367>
- Reason J. (1997). Book , Managing the Risks of Organizational Accidents. Ashgate Publishing Ltd., Aldershot; <https://doi.org/10.4324/9781315543543>
- Reason J., Hollnagel E., Paries J. (2006). Revisiting the „Swiss cheese” model of accidents. EEC Note No. 13/06. EUROCONTROL Experimental Centre, Brétigny-sur-Orge, France; <https://doi.org/10.1518/001872008X250773>
- Richard von Mises, Mathematical Theory of Probability and Statistics, Edited and Complemented by Hilda Geiringer Academic Press, New York/London (1964) DOI: <https://doi.org/10.1017/S0008439500029192>
- Rider KL. A simple approximation to the average queue size in the time-dependent M/M/1 queue. Journal of the ACM 1976; 23 (2): 361–367;
- Rosenlund SI. Busy periods in time-dependent M/G/1 queues. Advances in Applied Probability 1976; 8 (1): 195–208;
- Rothkopf MH, Oren SS. A closure approximation for the nonstationary M/M/s queue. Management Science 1979; 25 (6): 522–534;
- Rothkopf MH, Johnston RG. Routine analysis of periodic queues. IIE Transactions 1982; 14 (3): 214–218;
- R. Core Team 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0; <http://www.r-project.org/>
- Safanov, L. A., Tomer, E., Strygin, V. V., Ashkenazy, Y., & Havlin, S. (2002). Delayed-induced chaos with multi-fractal attractor in a traffic flow model. Europhysics Letters, 57, 151–157; <https://doi.org/10.1209/epl/i2002-00555-0>
- Salmon P.M., Read G.J., Stanton N.A., Lenné M.G. (2013). The crash at Kerang: investigating systemic and psychological factors leading to unintentional non-compliance at rail level crossings. Accident Analysis and Prevention 50, 1278–1288; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.09.029>
- Saobraćajni pravilnik („Službeni glasnik ZJŽ” br. 3/94, 4/94, 5/94, 4/96 i 6/03)
- Savage, I. (2006). Does Public Education Improve Rail-Highway Crossing Safety? Accident Analysis and Prevention 38 (2), 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.10.001>
- Sawalha, Z., Sayed, T. (2001). Evaluating Safety of Urban Arterial Roadways. Journal of Transportation Engineering, 127, 151–158. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-)

947X(2001)127:2(151)

- Sessler, P. (2007). Traffic on the roads and links to the Chaos Theory. *Helium*, 2012
- Shankar, V., Mannering, F., Barfield, W. (1996); Statistical analysis of accident severity on rural freeways. *Accident Analysis and Prevention* 28 (3), 391–401; [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(96\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0001-4575(96)00009-7)
- Shmueli, G., Minka, T. P., Kadane, J. B., Borle, S., Boatwright, P. (2005). A useful distribution for fitting discrete data: revival of the Conway-Maxwell-Poisson distribution. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C*, 54, 127–142. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2005.00474.x>
- Silla A.; Kallberg V.-P. (2012), The development of railway safety in Finland, *Accident Analysis and Prevention* 45: 737–74; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.043>
- SNCF Réseau, 2010. Statistical Analysis of Accidents at LXs. France.
- SNCF Réseau (2011), World Conference of Road Safety at Level Crossings (Journée Mondiale de Sécurité Routière aux Passages à Niveau), France; <http://www.planetoscope.com/automobile/1271-nombre-de-collisions-aux-passages-a-niveau-en-france.html>
- SNCF Réseau (2015), 8th National Conference of Road Safety at Level Crossings (8ème Journée Nationale de Sécurité Routière aux Passages à Niveau), France; <http://www.sncf-reseau.fr/fr/dossier-de-presse-8eme-journee-nationale-de-securite-routiere-aux-passages-a-niveau>
- Soumya Sharma, S., Pulugurtha S. S. Modeling Crash Risk at Rail-Highway Grade Crossings by Track Class (2019). *Journal of Transportation Technologies* Vol.9 No.3, July 2019 [10.4236/jtts.2019.93016](https://doi.org/10.4236/jtts.2019.93016)
- Stadje W. A note on the simple queue with variable intensities and two servers. *Operations Research Letters* 1990; 9 (1): 45–49;
- Stanton N.A., Walker G.H. (2011), Exploring the psychological factors involved in the Ladbroke Grove rail accident. *Accident Analysis and Prevention* 43 (3), 1117–1127; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.12.020>
- Stefanova T., Burkhardt J.-M., Filtner A., Wullems C., Rakotonirainy A., Delhomme P. (2015). Systems-based approach to investigate unsafe pedestrian behaviour at level crossings. *Accident Analysis and Prevention* 81 (0), 167–186; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.04.001>
- Taaffe MR, Ong KL. Approximating nonstationary Ph(t)/M(t)/s/c queueing systems. *Annals of Operations Research* 1987; 8 (1): 103–116;
- Taaffe MR, Clark GM. Approximating nonstationary two-priority non-pre-emptive queueing systems. *Naval Research Logistics* 1988; 35 (1): 125–145;
- Tanackov, I., Sinani, F., Stanković, M., Bogdanović, V., Stević, Ž., Vidić, M., Mihaljev-Martinov, J. (2019). Natural Test for Random Numbers Generator Based on Exponential Distribution. *Mathematics*, 7 (10), 920 <https://doi.org/10.3390/math7100920>
- Tanackov, I., Prentkovskis, O., Jevtić, Ž., Stojić, G., Ercegovac, P. (2019). A New Method for Markovian Adaptation of the Non-Markovian Queueing System Using the Hidden Markov Model, *Algorithms*, 12 (7), 133; <https://doi.org/10.3390/a12070133>

- Tan X, Knessl C, Yang YP. On finite capacity queues with time dependent arrival rates. *Stochastic Processes and their Applications* 2013; 123 (6): 2175–2227;
- Tey L.S., Ferreira L., Wallace A. (2011), Measuring driver responses at railway level crossings. *Accident Analysis and Prevention* Volume 43, Issue 6, November 2011, 2134-2141; <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.06.003>
- Tipper D, Sundareshan MK. Numerical methods for modeling computer networks under nonstationary conditions. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 1990; 8 (9): 1682–1695;
- Wragg A. The solution of an infinite set of differential-difference equations occurring in polymerization and queueing problems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 1963; 59 (01): 117–124.
- Uputstvo o postupcima u slučaju nastanka nesreća i nezgoda na području „Infrastruktura železnice Srbije” a.d. br.4/2018-986-250 od 09.10.2018. godine;
- Uredba o kategorizaciji državnih puteva („Sl. glasnik RS”, br. 105/2013, 119/2013 i 93/2015);
- Uredba o kategorizaciji železničkih pruga koje pripadaju javnoj železničkoj infrastrukturi „Službeni glasnik RS”, broj 92 od 29. juna 2020. godine;
- U. S. Department of Transportation, Washington, D.C. <http://www.dot.gov>
- Van As HR. Transient analysis of Markovian queueing systems and its application to congestion-control modeling. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 1986; 4 (6): 891–904;
- Virginia Highway & Transportation Research Council  
[https://www.researchgate.net/publication/237571880\\_Virginia\\_Transportation\\_Research\\_Council](https://www.researchgate.net/publication/237571880_Virginia_Transportation_Research_Council)
- Vukadinović S., Sučević D. : Slučajni procesi Markova i teorija masovnog opsluživanja u primeni na probleme saobraćaja, Tehnika, Saobraćaj, 10, 1970.
- Vukadinović, S. Masovno opsluživanje, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- Vukadinović S., J. Popović, Matematička statistika, Knjiga 2. izdanje, 2004.
- Wei Y., Guo Y., Dong D., Li Dewena (2012), Public places safety management evaluation of railway stations, *Procedia Engineering* 45, 240 – 247, Published by Elsevier; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.151>
- Wilson J.R. (2014). Fundamentals of systems ergonomics/human factors. *Applied Ergonomics* 45, 5–13; <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.03.021>
- Wigglesworth E.C. (2001), A human factors commentary on innovations at railroad-highway grade crossings in Australia. *Journal of Safety Research* 32 (3), 309–32; [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(01\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(01)00053-6)
- Woods, M.D., Slovak, R., Schnieder, E. (2008). Safer European level crossing appraisal and technology (SELCAT)-D3 report on risk modeling techniques for level crossing risk and system safety evaluation. *Rail Safety Stand. Board (RSSB)* 66–67;
- Xiang L., M. R. Saat, C. P.L. Barkan (2013), Integrated risk reduction framework to improve railway hazardous materials transportation safety, *Journal of Hazardous Materials* 260, 131– 140;

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.052>

Zakon o bezbednosti saobraćaja na putevima („Službeni glasnik RS”, br. 41/2009, 53/2010, 101/2011, 32/2013 - odluka US, 55/2014, 96/2015 - dr. zakon, 9/2016 - odluka US, 24/2018, 41/2018, 41/2018 - dr. zakon, 87/2018, 23/2019 i 128/2020 - dr. zakon);

Zakon o bezbednosti u železničkom saobraćaju („Službeni glasnik RS”, broj 41 od 31. maja 2018. godine);

Zakon o putevima („Službeni glasnik RS”, br. 41 od 31. maja 2018, 95 od 8. decembra 2018 - dr. zakon);

Zakon o železnici („Službeni glasnik RS” br. 41 od 31. maja 2018. godine);

Zhang J, Coyle EJ. The transient solution of time-dependent M/M/1 queues. IEEE Transactions on Information Theory 1991; 37 (6): 1690–1696.

## PRILOG: PLAN TRETMANA PODATAKA

*Ovaj Obrazac čini sastavni deo doktorске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.*

### План третмана података

<b>Назив пројекта/истраживања</b>
Модел за процену и компарацију ризика однастанка несрећа и незгода на путно-пужним прелазима
<b>Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање</b>
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за саобраћај
<b>Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање</b>
Докторске академске студије, Студијски програм: Саобраћај, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
<b>1. Опис података</b>
<p>1.1 Врста студије</p> <p><i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i></p> <p><u>Докторска дисертација</u></p> <p>_____</p> <p>_____</p>
<p>1.2 Врсте података</p> <p><input checked="" type="radio"/> а) квантитативни</p> <p><input type="radio"/> б) квалитативни</p>
<p>1.3. Начин прикупљања података</p> <p>а) анкете, упитници, тестови</p> <p>б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи</p> <p>в) гено типови: навести врсту _____</p> <p><input checked="" type="radio"/> г) административни подаци: навести врсту <u>статистички подаци</u></p>
<p>Национални портал отворене науке – open.sc.rs</p>

д) узорци ткива: навести врсту \_\_\_\_\_

б) снимци, фотографије: навести врсту **фотографије** \_\_\_\_\_

е) текст, навести врсту **литературни извори** \_\_\_\_\_

ж) мапа, навести врсту **googlemaps** \_\_\_\_\_

з) остало: описати \_\_\_\_\_

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Еxcel фајл, датотека **.xlsx** \_\_\_\_\_

б) SPSS фајл, датотека \_\_\_\_\_

в) PDF фајл, датотека \_\_\_\_\_

д) Текст фајл, датотека **.docx** \_\_\_\_\_

е) JPG фајл, датотека **.jpg** \_\_\_\_\_

ф) Остало, датотека \_\_\_\_\_

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) број варијабли **велики број**

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) **велики број**

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) временски размак између поновљених мера је \_\_\_\_\_

б) варијабле које се више пута мере односе се на \_\_\_\_\_

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као \_\_\_\_\_

Напомене: \_\_\_\_\_

Дали формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) Да

б) Не

Ако је одговор не, објаснити \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 2. Прикупљање података

### 2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

#### 2.1.1. У оквиру ког истраживачког напрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип \_\_\_\_\_

б) корелационо истраживање, навести тип \_\_\_\_\_

в) анализа текста, навести тип прикупљање података анализом доступне литературе \_\_\_\_\_

д) остало, навести шта \_\_\_\_\_

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### 2.2 Квалитет података и стандарди

#### 2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да  Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? \_\_\_\_\_

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

\_\_\_\_\_

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

**Квалитет података је контролисан непосредним увидом у резултате истраживања.** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

**Контрола уноса података у матрицу извршена је унакрсним поређењем појединачних и сумарних вредности у матрици са вредностима из иницијалне базе података.** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### 3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у **репозиторијум докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду**

3.1.2. URL адреса <https://www.cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI \_\_\_\_\_

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а)  Да

б) Да, али после ембарга који ће трајати до \_\_\_\_\_

в) Не

Ако је одговор не, навести разлог \_\_\_\_\_

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



### 3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? \_\_\_\_\_

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

---

---

*Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.*

---

---

---

---

### 3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? \_\_\_\_\_

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да  Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да  Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да  Не

Образложити

---

---

## 4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

#### 4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности ([https://www.paragraf.rs/propisi/zakon\\_o\\_zastiti\\_podataka\\_o\\_licnosti.html](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html)) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да  Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

---

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да  Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- a) Подаци нису у отвореном приступу
- b) Подаци су анонимизирани
- c) Остало, навести шта

---

---

### 5. Доступност података

#### 5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

---

---

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

---

---

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

---

## 6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

**Памела Ерцеговац** мејл: pamela.ercegovac@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

**Памела Ерцеговац** мејл: pamela.ercegovac@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

**Памела Ерцеговац** мејл: pamela.ercegovac@uns.ac.rs